

# 全球氣候變遷下的飛航安全維護

國立臺灣大學 氣候天氣災害研究中心

林得恩

## 摘要

氣候變遷及全球暖化對於環境的影響與干擾，在時空分布上，有顯著的加劇與擴大變化；極端天氣事件的統計個數也有逐年向上遞增的趨勢。從高溫熱浪、海平面上升、極端降雨天氣系統增多，以及颱風增強等面向，思考強化對我飛安維護的風險管控。

建議的具體因應處置作為有預先擬定備案，有效應變處置，尤其是溫度場與降雨場的變化趨勢；強化機場基礎工事設計，提高抗災的風險閾值；以及更多觀遙測的科學實驗投入支援，藉此掌握更多全球暖化反應的訊號與特徵，落實完善飛航安全的維護。

## 壹、前言：

氣候變遷、全球暖化已成不可避免的環境趨勢，且發生頻度與強度日趨頻仍、日漸嚴重，反應在20世紀中期以後，則愈加顯著。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 簡稱IPCC, 聯合國政府間氣候變遷小組)於2013年公布的第5次評估報告指出，從西元1880年開始到2012年期間，全球地表平均溫度大約上升攝氏0.85度。隨後，分別在2021年8月9日及2022年2月28日公布氣候變遷第6次評估報告的第一工作小組

報告與第二工作小組報告，呼籲提醒全球暖化將在短期(2021-2040年)內升溫至1.5°C，未來將無法避免的增加多種氣候危害。

氣候變遷及全球暖化對於環境的影響與干擾，不論是反應在天氣或是氣候的時空尺度上，都有顯著的加劇與擴大趨勢(林，2008；林等，2013)。從大氣和海洋變暖、積雪和冰蓋減少、海平面上升、溫室氣體濃度增加以及極端降雨或乾旱等，屢屢打破歷史觀測紀錄(林等，2008；林，2022)。而從過去的研究也顯示(林，2007；林，2010；林與林，2010；林等，2010)，這些極端天氣事件的肇生，當時環境量場的異常表現，特別是反應在溫度場與降雨場上，對我飛航安全維護，常常是風險管控的重要考驗(林等，2016)。

## 貳、氣候變遷下的極端天氣：

近年來，由於氣候變遷日趨嚴重、全球暖化日漸頻仍，肇致極端天氣事件襲捲全球各地，也屢屢創下局部地區的歷史氣候紀錄。同時，國際氣象專家也提出警告，未來，極端天氣可能成為新的常態，值得持續追蹤關注，並積極應處。

所謂的極端天氣事件，通常是指不正常、嚴重、季節性或超出歷史平均數值的天

氣事件。本文摘要整理近 5 年 (2017 至 2021 年)，世界各地發生的重要極端天氣事件，主要囊括有颶風、極端降雨、熱浪及低溫等，分述如下：

1. 2017 年：

根據緊急事件數據資料庫 (The Emergency Events Database, EM-DAT) 統計分析，2017 年較嚴重的極端天氣事件計有美國在 8 月的哈維 (HARVEY) 颶風及 9 月的艾瑪 (IRMA) 颶風，這 2 場侵襲美國的颶風，估計損失高達 1,080 億美元，成為該年災害造成經濟損失最嚴重的前兩名事件，僅次於 2005 年侵襲紐奧良的卡崔娜 KATRINA 颶風，並與 2012 年侵襲紐約的森迪 SANDY 颶風相當。

哈維颶風侵襲美國德州 (圖 1)，除造成

休士頓嚴重淹水，衝擊石化工業產能外；甚至影響全球石化產業。緊接著九月的艾瑪颶風侵襲佛羅里達州，影響農業與觀光旅遊業鉅大，造成嚴重的經濟損失以及人物傷害，遠遠超過當年度其它災害事件之損失。

2. 2018 年：

從緊急事件數據資料庫 (EM-DAT) 的統計資料來看，在 2018 年的災害類型中，以極端降雨所造成的洪災最為嚴重，佔災害總數的 39% 強。其中，就所受影響來看，又以印度克勒拉省 (Kerala) 所發生的洪災影響層面與影響程度最大，估計有 2,322 萬人受到程度不一的干擾、破壞、損失與傷害。

印度從 6 月開始受到印度季風影響，陸續傳出災情，2018 年印度因颱風及極端降雨災害喪生者共有 1,735 人，其中克勒拉邦

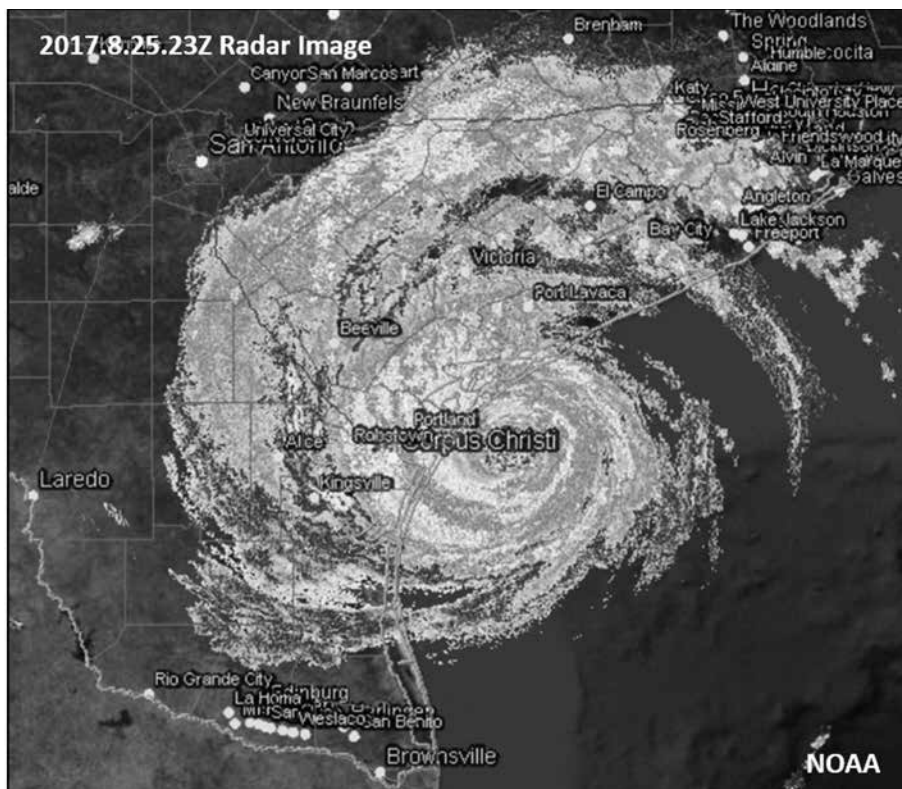


圖 1、2017 年 8 月，哈維颶風侵襲並登陸美國德州，從雷達回波圖顯示結構相當完整且紮實(資料來自 NOAA)

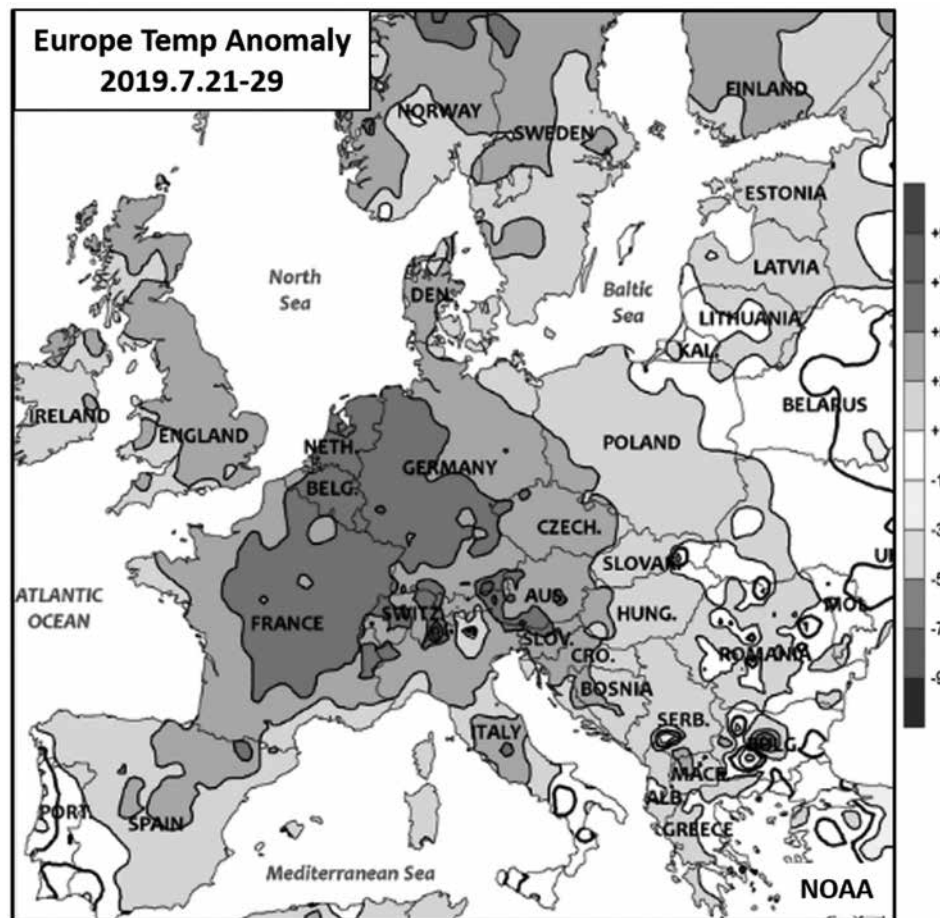


圖2、2019年極端高溫熱浪的前五名，大多發生歐洲，途中顏色愈紅，代表比氣候平均值愈熱 (圖資來自NOAA)

(Kerala) 死亡人數最多達 507 人，該事件共影響 2,322 萬人。

另外，日本 7 月的極端降雨事件，共造成 232 人死亡與失蹤，影響人數超過 150 萬人，上回如此重大的洪災災害已是 30 年前，對於防災首屈一指的日本而言，此次災害規模相當罕見。同時，也突顯出氣候變遷加劇下，面對極端降雨天氣系統，在預報診斷及應變處置上的困境與不足。

### 3. 2019 年：

人類有紀錄以來第 3 高溫就發生在 2019 年，僅次於 2016 年及 2020 年的高溫紀錄，比全球長期平均溫度要高出 0.95°C。在五大

洲中，皆有國家發生熱浪高溫情況，歐洲、亞洲、澳洲南部、非洲馬達加斯加、紐西蘭、北美洲和南美洲東部的部分地區，也同時量測到了創紀錄的陸地最高溫度。

2019 年極端高溫熱浪的前五名，大多發生歐洲 (圖 2)，也肇致近 3,000 人死亡；不但影響範圍大、持續時間長，且無有效積極對策具體因應。英國氣象局估計，在過去 50 年，溫暖期的時間長度已經拉長了一倍。由於全球暖化，最近的熱浪所造成的極端酷熱在現今出現的機會比過去高出 10 倍，而且情況還有可能加速惡化。

### 4. 2020 年：

根據美國國家海洋暨大氣總署 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 指出：全球陸地和海洋溫度，係自 1880 至 2020 年有紀錄以來第 2 高溫紀錄，與 2016 年全球最高溫紀錄僅差 0.02°C。

2020 年的大氣環境特徵，主要是在夏季的前期，西太平洋副熱帶高壓明顯偏強且高壓脊線西伸，涵蓋範圍較氣候平均更廣、更大；也可能是造成 2020 年東亞及太平洋區域各種極端天氣事件肇生的關鍵因子，包含可能影響西北太平洋的颱風生成與颱風走向，以及東亞與東南亞降雨情況。這與過去氣候平均的訊號表現上，有著顯著的差異分布。

#### 5. 2021 年：

根據美國國家海洋及大氣總署 (NOAA) 的全球氣候報告顯示，2021 年受到反聖嬰現

象 (La Niña) 影響，全球氣溫略為降溫；而 2021 年 2 月溫度是自 2014 年以來最冷的 2 月；另外，北美洲、南美洲、歐洲和亞洲雖然全年溫度是高於平均溫度，但部分月份溫度卻是低於歷史氣候紀錄，顯示溫差變化相當劇烈。

從實際案例來看，2021 年，美國夏威夷年溫度是自 2012 年以來最冷一年；亞洲的 1 月也是自 2012 年以來最冷的 1 月 (圖 3)。西歐和中歐 2021 年的 4 月，經歷寒冷氣溫，局部地區更創下歷史最低溫，斯洛維尼亞 (Slovenia) 的 4 月溫度是近百年最冷的月份。另一方面，非洲 2021 年的高溫則是過去百年有氣象紀錄以來，排名第三熱的一年 (與 2019 年並列)。

整體而言，就緊急事件數據資料庫

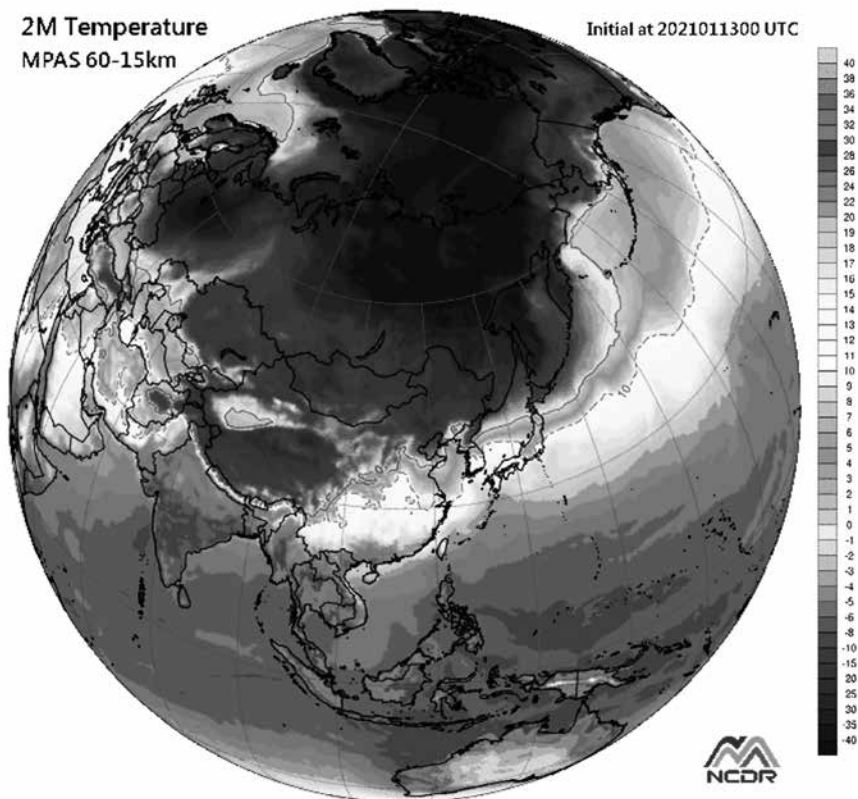


圖3、亞洲的1月也是自2012年以來最冷的1月(圖資來自NCDR)。

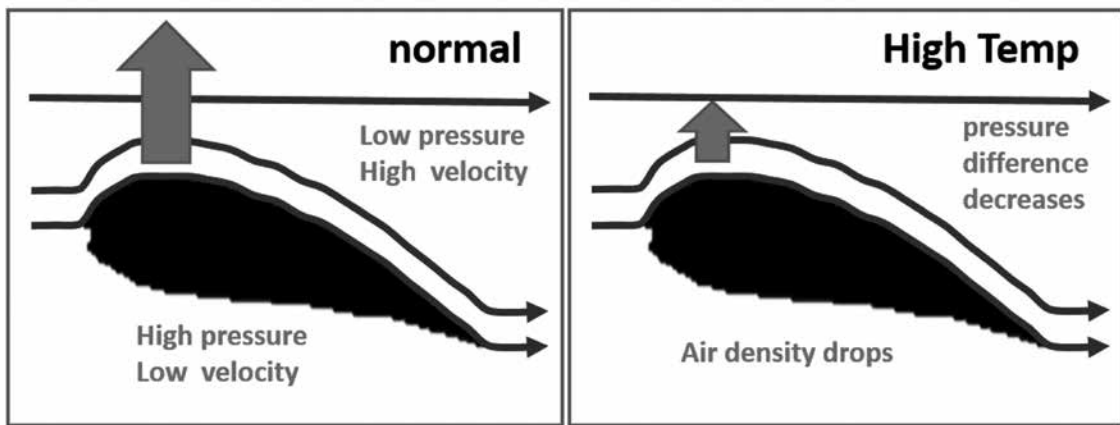


圖4、由於在機翼下方的氣流壓力大於機翼上方的氣流壓力，使得機翼有向上的壓力差，自然使機翼向上升起，這就是升力的產生。在高溫熱浪的環境條件下，由於熱空氣密度比較小，向上的壓力差變小，整個升力也就跟著變小

(EM-DAT) 的統計分析資料，隨著氣候變遷的腳步加快，自 2017 至 2021 年，全球重大天然災害事件的逐年統計個數有向上遞增的趨勢。2017 年計有 302 件；2018 年略為下降，計有 282 件；2019 年又再上升，計有 361 件；2020 年有 350 件；到了 2021 年，計有 385 件。面對全球氣候變遷加劇的困境，極端天氣肇生的頻度與強度，一次又一次地打破紀錄，一次又一次地造成損災，這也將是全人類不可迴避且需亟待克服的關鍵課題。

### 參、氣候變遷與飛航安全：

氣候變遷所衍生的極端天氣事件，直接攸關我遂行飛航的安全維護以及任務調度。全球每天約有 100,000 個航班，載送著 800 萬名乘客，在空中交通的運輸過程當中，飛航安全絕對是首要的關鍵維護項目，大氣環境的條件參數是影響的重要變因。本文將擇高溫熱浪、海平面上升、極端降雨以及颱風增強等，分述如下：

#### 1. 高溫熱浪影響航班調度與飛航安全：

近年來，歐洲和美國遭遇嚴重熱浪侵襲事件頻傳，氣溫迭創新高。研究指出，除

了人類燃燒化石燃料，導致氣候變遷外；北極加速暖化、噴射氣流遷移，以及熱穹增溫現象，也都是高溫熱浪肇生的可能主因。觀測推估，北極暖化速度，約是全球暖化速度的 3 至 4 倍；意味著北方氣溫與近赤道地區的溫差梯度減小，這也導致北極噴射氣流擺動，因而容易造成諸如熱浪、洪水等極端天氣事件發生。「熱穹效應 (heat dome)」指的是當在暖季時，炎熱乾燥的大氣環境，地表受日照加熱更有效率，由於熱空氣密度較小，於是就會有上升運動。但若這時環境是受高氣壓壟罩，強烈的下沉氣流會將上升的熱空氣下推，就好像蓋子一樣，牢牢悶住，熱空氣被壓縮反而會覺得更熱，增溫影響程度將會更加嚴重。

隨著全球暖化加劇，極端天氣發生的頻度與強度愈來愈頻仍與嚴重，尤其是面對日趨險峻的高溫熱浪環境挑戰，無論是飛機的設計師、機場環境的規劃人員、執行任務的飛行員或是維護飛行起降安全的管制員，都必須在空中和地面上預先做出有效且積極的反應與對策。

飛機能夠順利起飛，需要足夠的升力。升力的產生，來自氣流流經飛機機翼上、下

表面時，下表面的弧度較平緩，上表面的弧度較大，當氣流流經下表面弧度較小時速度不會增加太多，因此氣流壓力不會降低太多；相對地，如果氣流流經上表面弧度較大時，速度就會增加很多，因此氣流壓力會降低很多。由於在機翼下方的氣流壓力大於機翼上方的氣流壓力，使得機翼有向上的壓力差，自然使機翼向上升起，這就是升力的產生（圖4）。來自飛機機翼所產生的升力，克服地心引力的飛機重量，及發動機提供向前的推力，基本上，會有2個作用，1個會使得氣流快速流過飛機機翼，持續產生如上所述的升力，克服飛機重量。另1個是飛機向前移動的推力，克服氣流帶來的飛機阻力，使飛機前進能到達目的地。然而，在高溫熱浪的環境條件下，由於熱空氣密度比較小，浮力比較大，向上的壓力差不見了，整個升力就也會跟著變小，對於正要準備起飛的飛機來說，無疑是個嚴峻的挑戰。這也是國際民用航空組織（ICAO）在2016年曾警告說，環境異常高溫可能會對飛機起飛性能造成嚴重後果的道理所在。

另一方面，由於高溫熱浪愈加明顯，所引發的熱脹冷縮效應，使得空氣密度愈加稀薄，導致飛機發動機性能衰減，推力愈加不足；飛機的零元件，如機上的電子設備也會因為過熱，它們的密封條會軟化或融化，降落時車溫度會升高，以及機艙的冷卻問題等，體現在飛機的加速性能上，也就會明顯轉差，是為飛航風險的致命危機之一。現階段應處作為，也只能少裝貨物或燃料，減輕飛機重量，增加升力；或使用更長跑道，俾利進行加、減速操作；或改選環境氣溫下降些，再行飛航起降任務等作為因應。但是，這對航運成本利潤、飛航硬體投資建設，以及航運管制人員額外工作負荷，都是一項倍

加嚴峻的新型考驗。

根據哥倫比亞大學地球研究所的最新研究，到2080年，機場的最高氣溫有可能升高攝氏4至8度，如果未來幾年，溫室氣體排放沒有得到明顯的控制，全球氣溫會升高攝氏3度或以上，也將導致柏油路面吸熱，機場跑道的氣溫將會上升更高，嚴重影響到飛航正常的起降作業與調度。

具體的實例，2017年夏天，美國鳳凰城天港國際機場因為環境氣溫驟升過高，跑道水銀溫度計量測到攝氏48度，導致飛機無法正常起飛，50多架次的航班被迫取消或延後起飛，也有7架次的班機因此誤點。2022年7月，熱浪襲擊歐洲，高溫衝破攝氏40度，也使得英國盧頓機場部分機場跑道出現缺陷，疑似局部跑道表面受高溫炙熱融化，場務一度停運，導致航班延遲長達4小時，或被迫在鄰近其它機場起降；英國空軍也在飛航安全考量下，立即暫停了其最大基地的所有飛機起降任務。

## 2. 海平面上升，淹沒跑道：

全球暖化加劇下，海水溫度升高，造成體積膨脹，加上全球冰雪覆蓋量減少，融化匯流入海，導致海平面有持續上升的趨勢。從1850年就開始有了海平面的觀測作業，根據實測資料記錄，在過去一百多年全球海平面平均上升至少20公分；上升速度更從2000年起，加快趨勢更加顯著。

根據聯合國政府間氣候變化專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change，簡稱IPCC）2022年2月底發表的第6號報告，即使碳排放停止增加，地球氣溫維持在1.5度，至本世紀末，海平面仍會上升28

至 55 公分。從美國國家海洋和大氣管理局 (NOAA) 的研究數據更顯示，海平面上升的速度增加了一倍多，從 20 世紀大部分時間的每年 0.14 公分，上升到 2006 年至 2015 年的每年 0.36 公分。甚至預測，2040 年前海平面將可能上升 60 公分，2050 年前則是可達 90 公分。

沿海的低海拔地區，長期以來一直被視作搭建新跑道和航站樓址的理想地點。過去，全球不少大型機場多位處於沿海的地區，主要的原因，沿海地區地勢相對平坦、偏少障礙物，飛機起降操作較為容易；另一方面，減少噪音、避免擾民，也是重要考量因素之一。但是，現今因為氣候變遷、全球暖化，隨著海平面升高，以及愈來愈多極端的暴風雨，這些機場的處境也愈來愈加危險。

根據英國航空分析公司「Cirium」的統計分析資料，全球乘客量較多的 100 個主要機場中，28 個位於海拔 10 公尺以下；其中亞洲地區多個機場海拔更在 3 公尺以下，包括曼谷的蘇萬那普 (Suvarnabhumi Airport) 和廊曼國際機場 (Don Mueang Airport)、中國上海的浦東國際機場和虹橋國際機場，還有中國深圳的寶安國際機場。據評估預測，倘若海平面上升 3 公尺，至少會有 224 個機場會有沒入水中的危機。

2012 年，颶風桑迪 (Hurricane Sandy) 強風摧殘淹沒了紐約市所有的 3 家機場，大量且集中的強降雨，使得跑道積淹水嚴重，場面設施受風吹損，也導致機場關閉、航班調度大亂，當地航線癱瘓了好幾天，乘客和機組人員只能痴痴地在大廳待命等候開場。另一實例，由於近年來的氣象觀測資料顯示，

新加坡的年平均氣溫由 26.6°C 升至 27.7°C，特別是在 1975 年至 2009 年，新加坡海峽的平均海平面高度已經從每年 0.12 公分，增速上升至 0.17 公分。氣候變遷可能帶來艱鉅挑戰，新加坡樟宜機場因降雨強度增加，以及海平面升高，面臨水患困擾；星國業已採取初步應變措施，包括強化機場排水系統，藉以減少淹水風險。

### 3. 極端降雨天氣系統增大飛航潛勢風險：

全球各地的天氣，永遠都會是變化多端的；但是，在氣候變遷加劇下，常常會使得這些變化更加極端。IPCC AR6 的報告提出，科學家目前已經有足夠的證據來解釋溫度和總降水量與氣候變遷趨勢可能存在的關係。根據美國國家科學院、工程院和醫學院在 2016 年的研究結果也顯示，若以機率分布角度來看，平均值、變異數及機率分配形狀的改變，皆可能造成極端值的改變，故極端天氣事件的發生頻率可和氣候變遷做歸因分析，所獲得的初步結論，極端天氣事件的發生，並不一定源自於氣候變遷，但氣候變遷的影響與某些極端天氣事件發生的頻率和強度具有正向的相關性。尤其在極端高溫或熱浪以及極端降雨事件的頻率和強度上，有較充分的證據去解釋其之間的影響和變化，信心度為中到高的等級 (表 1)。

全球暖化加劇惡化下，使得大氣中的水汽愈來愈多。更多的水汽透過動力、熱力或機械的舉升機制，在飽和凝結的物理過程中，容易產生更多的水滴，或是造成更強的降雨；而這些現象，有時候就會發生在很短的時間和很小的區域內，並肇致局部地區所謂的短延時強降雨劇烈災害天氣。通常這些劇烈災害天氣系統不單只是降雨量相當顯著外，過程中還會伴隨著強風、冰雹、亂流、



	Capabilities of Climate Models to Simulate Event Class	Quality/Length of the Observational Record	Understanding of Physical Mechanisms that Lead to Changes in Extremes as a Result of Climate Change
● = high ● = medium ○ = low			
Extreme cold events	●	●	●
Extreme heat events	●	●	●
Droughts	○	○	○
Extreme rainfall	○	○	○
Extreme snow and ice storms	○	○	○
Tropical cyclones	○	○	●
Extratropical cyclones	○	○	○
Wildfires	○	○	○
Severe convective storms	○	○	○

表1、由美國國家科學院、工程院和醫學院在2016年的研究結果顯示，說明科學家對於極端天氣事件與氣候變遷歸因分析的可信度。可信度高的極端天氣事件為，熱浪、寒潮；可信度中的事件為，乾旱、極端降雨和溫帶氣旋

雷電或劇烈的垂直運動等現象，對我飛航安全造成極大的潛勢風險。

2022年10月24日，南韓大韓航空一架客機，在劇烈降雨天氣下，當時天氣惡劣、風強雨大、能見度又低，客機3度嘗試降落菲律賓宿霧國際機場降落時，最後衝出跑道，機身嚴重受損，所幸無人員死亡。

再看臺灣的案例，根據氣候統計資料，每年梅雨季平均會有4至5道鋒面系統影響台灣，但造成豪大雨的主要天氣系統卻是伴隨在梅雨鋒面上具組織性的中尺度對流系統(Mesoscale Convective System, MCS)。MCS不但生命期持久，且常在華南地區生成後東移，導致台灣局部地區產生豪大雨的現象；也常伴隨著暴雨、強風、龍捲風、冰雹、雷電和下衝氣流等災害性天氣，對我飛安維護常帶來顯著的影響破壞與風險潛勢。

2005年6月12至15日，滯留梅雨鋒面造成連續四日的每日降雨量均在400mm以上。個案中，暖平流現象相當顯著，冷空氣可達500hPa，低對流層屬潛在不穩定的環境，整層大氣均屬潮濕狀態。所伴隨劇烈閃電(圖5)與垂直風切現象，可以說是一波接著一波進來，對流胞垂直運動相當旺盛，不但是發展成熟、影響劇烈，且持續性高，氣象作業人員在飛航任務遂行期間，一定要加強守視及預先提醒(尤其是雷雨胞前緣的下衝氣流肇生)。飛行人員，則需在任務提示後，洞悉掌握環境變化，落實風險管控作為，盡量避開劇烈天氣雷雨胞(及其附近空域)，俾利確維飛航安全。

#### 4. 颱風增強，飛航安全大挑戰：

所謂的颱風(Typhoon)是一種強烈的熱帶氣旋，與北大西洋所稱的颶風(Hurricane)其實是相同的大氣現象，只是在不同地區，



命名不一樣而已，在西北太平洋稱為颱風，在北大西洋、北太平洋中部及東部則稱為颶風。一般來說，颱風包含有3個區域，即颱風眼、眼牆及螺旋雨帶等(Li et.al.,2002)。颱風眼是颱風中心一個約略為圓形的區域，其大小不一，直徑可小至10公里以下，也可大至200公里，但一般約為30至70公里。颱風眼內是整個颱風內氣壓最低，且溫度最高的地方，受眼牆團團包圍。眼牆則是圓環形的厚雲，雲內有很強的垂直運動，也就是上升氣流，是整個颱風內風力最強的地方，也常伴隨有很強的降雨。颱風眼以外的其它對流，一般都集中在一條條窄長的雨帶，其走向約略與地面風一致，由於這些雨帶好像螺旋一樣，捲進颱風的中心，所以也稱為螺旋雨帶。

颱風主要生成地區在西北太平洋及南海的熱帶海域。所形成颱風的環境條件，首先海溫要在攝氏26度以上，因為颱風發展所需的能量完全是依賴水汽蒸發，帶到大氣中的潛熱而來，如果海水溫度不夠造成潛熱供應不足的情況下，就不會有颱風。另外，最炎熱的赤道海面也不容易產生颱風，起碼要距離赤道緯度5度以上，才能產生足夠的科氏力，也就是因為地球自轉所造成的偏向力，讓周圍大氣中的空氣在壓力差的驅動下，不斷向低氣壓中心移動，最終形成颱風。

由於颱風需要在高海溫的環境下生成，因此，全球暖化下，造成颱風變多、強度變強，也就相當合理。然而也有科學家有不同的看法，他們認為從統計數據來看，近年的颱風數目並沒有增加，這也許是因為海水溫度一旦過高，反而讓氣流的上、下層分層結構比較穩定，導致颱風不易生成；但是，一旦生成，颱風強度往往具有增強的趨勢。

颱風增強的趨勢，攸關我飛航安全維護的推展甚鉅。因為，颱風在低層主要是流向低壓的內流氣流，在內區可產生很強的上升風速；而在高層則是反氣旋的外流氣流。由此可見，颱風內部結構中，顯著的上升與下降氣流，常常會使得飛機產生劇烈的顛簸，嚴重影響飛航的安全。另外，根據觀測顯示，颱風內常伴隨劇烈的對流雷雨胞，如果當飛機穿越雷雨區或冰雹區，由於機翼、機身等突出部位，電場很強，很容易使飛機發生雷擊事件，飛機表面也很容易遭到冰雹的撞

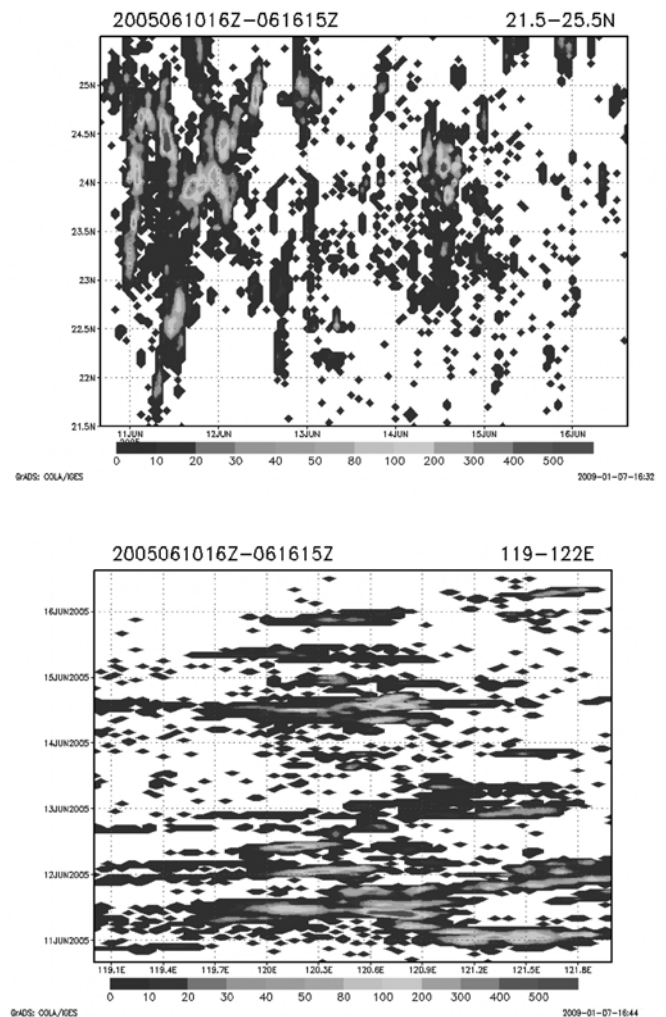


圖5、2005年6月11日至16日，上圖為緯度—時間落雷頻率分佈圖。下圖為經度—時間落雷頻率分佈圖。伴隨梅雨鋒面極端降雨的雷電現象，一波接著一波進來，對流胞垂直運動相當旺盛，不但是發展成熟、影響劇烈，且持續性高

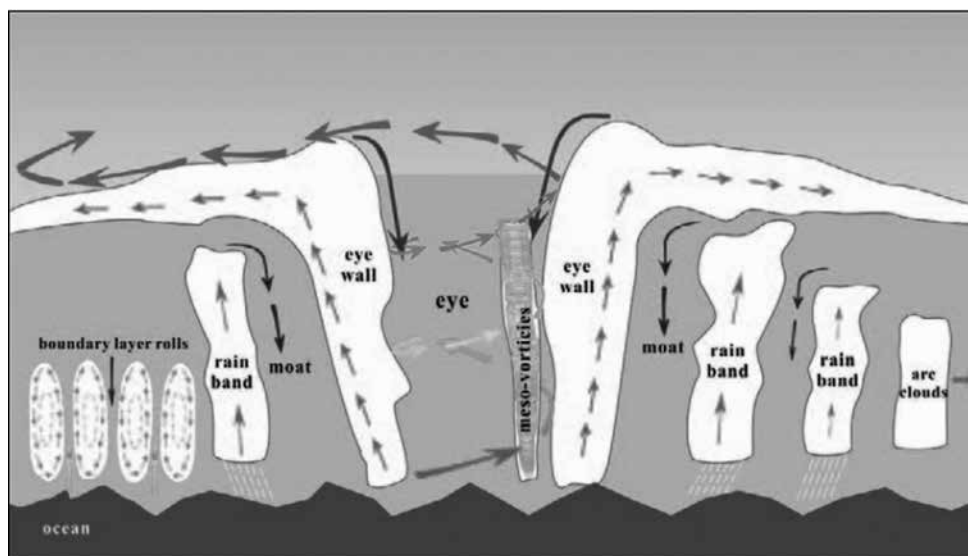


圖6、颱風結構包含有3個區域，即颱風眼、眼牆及螺旋雨帶；圖中，紅、黑箭號分別代表上升運動與下降運動(圖摘自Li et.al.)

擊。另一方面，颱風所伴隨的劇烈降水以及濃霧，常也會導致環境能見度驟降，低空風切變肇生頻率也會增高，這對飛機的起降作業，造成了極大的困擾與挑戰。

實例說明，2000年10月31日新加坡航空006號班機，預劃從新加坡樟宜國際機場出發，經桃園國際機場飛往洛杉磯國際機場。當晚飛行時的天氣，象神颱風正在侵襲當中，機場附近的雨帶一波接著一波移入。這架波音747型客機正準備自05左跑道起飛，因為颱風所伴隨的大雨造成跑道能見度不佳，加上機組人員的疏忽與塔台方面的溝通不良，機場的指示設施不夠，以及塔台航空交通管制員的不符合程序操作等等複合性的肇因，導致客機誤闖了正在施工維修而暫停開放的右跑道。在客機準備起飛、開始加速後，直到飛行員目視到停放在右跑道上的施工機具時，在高速前進的狀況下，已經無法及時煞車反應，最後以超過140節的速度，直接撞上施工機具。客機在跑道翻覆，機身斷裂成三截，並引起大火。在這場意外中，

共有79名乘客和4名機組員罹難，這是新加坡航空自創立以來，第一次發生有人員喪生的空難致命事故。

#### 肆、因應對策：

面對氣候變遷、全球暖化加劇的現況，所肇致的極端天氣事件以及環境量場變迭，對我飛航安全的干擾與影響甚鉅，建議的因應處置作為：

##### 1. 預先擬定備案，有效應變處置：

現今，因為全球暖化加劇的背景緣故，更使得局部地區增溫與熱浪的現況更加嚴峻。極端高溫會迫使飛機停飛，因為熱空氣的密度比冷空氣低，所以高溫天氣下機翼所產生的升力不足，使得飛機起飛會變得相當困難；另一方面，也因為氣候量場的變化，還會增加環境不穩定的強烈氣流，對於飛機起降作業，造成一定程度的干擾與影響。現階段，多採少裝貨物或燃料，或減少乘客數，減輕飛機重量，增加升力；或使用更長跑道，

俾利進行加、減速操作；或改選環境氣溫下降些，再行飛航起降任務等作為進行因應（如：選擇夜晚或清晨，再行執行飛行任務）。

另一方面，國際可再生能源機構（International Renewable Energy Agency，IRENA）的最新報告顯示，到2020年，太陽能、地熱、生物能、水力發電、陸地風力發電等最為常用的幾種可再生能源的價格，都將與化石燃料價格齊平或更低。飛機航行需要化石燃料，不過人類尚未找到可大規模使用的替代品。太陽能飛機進行環球飛行，雖已取得初步測試成功，但距離民用航空機載使用太陽能，尚有很長努力的空間；不過，在節能減碳的基本政策需求下，目標仍可以被期待與落實的。

至於，極端天氣的暴烈化，也需併行考量因環境溫度過低，導致飛機積冰現象所肇致的飛安風險。根據統計研究，飛行高度在2萬英尺以下，溫度攝氏0度以下，雲層中含水量超過0.125公克/立方公尺，以及水滴的直徑在0.015~0.05mm時，飛機表面就有可能結冰。一般來說，在飛機起飛前，當大氣溫度低於攝氏5度以下，且天空已經有明顯的降雨現象時，飛行員就要考慮啟動飛機的防冰系統，在必要的管路上進行加熱，並同時將發動機的部份熱空氣吹進機翼前緣，避免機翼積冰。並依據實際天候狀況，視需要請地面人員協助進行除冰與防冰程序。若在飛行航路上時，飛行員必須觀察判斷環境雲層特徵，盡可能避開這些可能危害的雲層，有效完成應變處置作為。

## 2. 強化機場基礎工事設計：

由於氣候變遷，海平面升高日趨顯著，加上愈來愈多因環境驟變而肇致的極端暴風

雨事件，無論是在降雨的強度或頻度，每每高出氣候平均值的分布特徵，甚至打破歷史紀錄，更衍生機場飛航風險的加劇增大。而機場早在規劃設計之初，或在調度使用之時，就應該主動將氣候變遷可能帶來的干擾與破壞納入整體評估考量，加強工事建物抗災防害的風險係數，並適時採具體且有效的因應對策進行修正，俾維飛航安全。

舉例來說，荷蘭是世上地勢最低的國家之一，首都阿姆斯特丹的史基浦機場，它不但是阿姆斯特丹的主要機場，也是往來歐、亞兩地的重要航空樞紐。機場預劃建址，原本位於哈萊默梅爾湖上，當年為興建機場，增加跑道腹地，於是將湖水抽乾，完成整體工事建築。由於該機場高度低於海拔4公尺以下，不但飛機降落只能靠目測飛行，倍增飛航風險之外；也常受因劇烈降雨導致的跑道機淹水之苦。爰此，2018年，荷蘭政府當局為該機場分期規劃增設了一套強化排水系統，並在機場地下興建大型的蓄水池，藉以貯藏雨水，減緩水情導致飛安風險。在美國明尼蘇達州，常常被密西西比河淹沒的St. Paul Downtown機場，現在已經有了便攜式防洪堤的設計，如果河水開始上漲之際，立即可以快速搭建起來。紐約拉瓜迪亞機場（La Guardia Airport）也正在用2800萬美元聯邦政府撥款，為機場添置防洪堤、雨水泵和全新的排水系統，升級應急變電廠和發電機，強化機場跑道排積淹水的應變功能。

另一實例，新加坡的樟宜機場（圖7）在1981年動工時，一號、二號跑道在海拔4公尺和4.5公尺。由於需應新法例要求，機場的新建築亦增加了高度，2020年啟用的第三號跑道是高於海平面4.8公尺，興建中的第五號客運大樓更在海平面上5.5公尺。



圖7、新加坡的樟宜機場在2020年啟用的第三號跑道，高於海平面4.8公尺，興建中的第五號客運大樓更在海平面上5.5公尺

### 3. 需要更多觀遙測的科學實驗投入支援：

氣候變遷已對人類生態及飛航安全造成嚴重衝擊，且日益顯著；為了可以對因氣候變遷所肇致之極端天氣的結構、型態與運動有更深入的认识及瞭解，過去多次透過設計、規劃整合大型科學觀測實驗，具體的作業回應在對劇烈降雨天氣系統的觀測、遙測與數值模擬上 (Lin, 2017；林，2022)，藉此串聯擴大科研價值，共同提昇對於劇烈降雨天氣系統的研究水準，為區域氣候變遷調適做出貢獻。如：1979年研究北美大陸 MCS 環境特徵的美國強風暴和中尺度實驗 (SESAME)；1987年研究東亞梅雨鋒面上的 MCS 的台灣地區中尺度實驗 (TAMEX)；1998年研究南海季風及其對流系統的南海季風實驗 (SCSMEX) 及針對華南、南中國海及台灣地區梅雨季大規模實地密集觀測實驗 (MYEX98)；2001年研究梅雨季複雜地形之局部環流變化的綠島中尺度實驗 (GIMEX)；

2008 及 2009 年也針對南海海域季風環境特徵，啟動的西南氣流觀測實驗 (SoWMEX) 等。

今 (2022) 年 5 月下旬至 8 月上旬，臺灣與美國及日本三方跨國合作，共同推動執行「臺灣區域豪雨觀測與預報實驗計畫 (TAHOPE)」，針對劇烈豪雨天氣系統進行監測分析，藉由整合探空、雷達 (圖 8)、衛星、光達、剖風儀、雨滴譜儀等精密儀器，觀測臺灣地區的梅雨鋒面、颱風及劇烈降雨等天氣現象、成因與過程；設置於新竹港南運河風景區的設備，包括美國國家大氣科學中心 (NCAR) 研發的大型可移動式 S-POL 氣象雷達，此雷達可以區分和分類各種類型的降水粒子，還可以量化水分含量以及降雨率，瞭解降雨胞的垂直運動結構。希望透過密集觀測作業，結合先進的大氣模式同化與預報技術，針對出現在臺灣及周邊區域的劇

烈極端降雨天氣系統，發展改善分析與預報的關鍵技術。有效提昇天氣預報及防災資訊的精準度，更有利於政府及亞太鄰近國家強化災害應變能力，降低因氣候變遷所帶來的衝擊。

### 伍、結論與建議：

氣候變遷及全球暖化對於環境的影響與干擾，不論是反應在天氣或是氣候的時空尺度上，都有顯著的加劇與擴大趨勢。

從過去的研究也顯示，這些屢屢打破歷史紀錄的極端天氣事件肇生，由當時環境量場的異常表現，特別是反應在溫度場與降雨場上，對我飛航安全維護，常常是風險管控的重要考驗。研究摘要整理近5年(2017至2021年)，世界各地發生的重要極端天氣事件，主要囊括有颶風、極端降雨、熱浪及低

溫等，發現全球重大天然災害事件的逐年統計個數有向上遞增的趨勢，這也將是全人類不可迴避且需亟待克服的關鍵課題。

氣候變遷、全球暖化所衍生的極端天氣事件，直接攸關我遂行飛航的安全維護以及任務調度。從高溫熱浪影響航班調度與飛航安全、海平面上升導致跑道淹沒、極端降雨天氣系統增大飛航潛勢風險，以及颱風增強，飛航安全大挑戰等，在在呼應大氣環境條件參數的更迭與變異，是飛航安全風險管控的重要因子。

建議的具體因應處置作為有預先擬定備案，有效應變處置，尤其是溫度場與降雨場的變化趨勢；強化機場基礎工事設計，提高抗災的風險閾值；以及更多觀遙測的科學實驗投入支援，藉此掌握更多全球暖化反應的訊號與特徵，落實完善飛航安全的維護。



圖8、今年，由台美日跨國合作推動「台灣區域豪雨觀測與預報實驗計畫(TAHOPE)」，整合探空、雷達等多種精密儀器，觀測臺灣地區的梅雨鋒面、颱風及劇烈降雨等天氣現象、成因與過程(圖摘自中央社)

參考文獻：

- 林得恩，2007：影響飛安甚巨之劇烈對流個案環境特徵分析 -- 以 2006 年 6 月 9-10 日梅雨鋒面期間台灣中南部豪大雨個案為例，飛航天氣，8，18-31。
- 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。
- 林得恩，2010：梅雨季超大豪雨個案之模擬與診斷分析，國立臺灣大學理學院大氣科學研究所博士論文。
- 林得恩，2022：劇烈降雨系統對高山陣地之風險評估，氣象預報與分析，250，1-15。
- 林得恩、王泰鈞、楊士禾，2016：飛航安全的隱形殺手 --- 以遭遇機尾亂流為例，空軍學術雙月刊，650，127-138。
- 林得恩、林裕豐，2010：劇烈對流系統對飛航安全之影響 --- 以 2008 年梅雨鋒面伴隨中尺度渦漩個案為例，第 5 屆海峽兩岸航空氣象與飛行安全研討會，台北，台灣，158-169。
- 林得恩、林裕豐、任亦偉，2013：台灣東北部超大豪雨之模擬分析研究，2013 第三屆航空科技與飛航安全學術研討會 (3rd Conference of Aeronautic Technology and Flight Safety)，空軍航空技術學院。
- 林得恩、張培臣、張明仁、梁江山、王仕均、簡國恩，2010：影響臺北松山機場飛安氣象因子之統計分析，氣象預報與分析，205，1-18。
- 戴志輝、林得恩、賴思運，2008：臺灣北部午後對流閃電與綜觀氣流風向之關係，大氣科學，36，179-196。
- Alexander L. V. and Arblaster J. M., 2017：Historical and projected trends in temperature and precipitation extremes in Australia in observations and CMIP5. *Weather Clim. Extremes*, 15,34–56.
- Li, X., W. Pichel, M. He, S. Wu, K. Friedman, P. Clemente-Colon, and C. Zhao, 2002: Observation of hurricane-generated ocean swell refraction at the Gulf Stream north wall with the RADARSAT-1 synthetic aperture radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40, 2131–2142.
- Lin De-En, 2017：Numerical simulation and diagnostic analysis of extreme rainfall events during the Mei-Yu season, 2017 Workshop on Typhoon and Storm across the Taiwan Straits, I-Ian, Taiwan.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine., 2016：Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change. Washington, DC: The National Academies Press. —