

出國報告（出國類別：進修）

「直升機事故調查訓練」
出國報告

服務機關：國家運輸安全調查委員會

姓名職稱：盧樹欣 副調查官
梁 能 副調查官

派赴國家地區：美國，加州，洛杉磯市

出國期間：111年10月30日至111年11月06日

報告日期：112年01月11日

目錄

摘要.....	ii
一、目的.....	1
二、過程.....	1
2.1 授課講座.....	2
2.2 課程安排.....	3
三、訓練課程重點摘要與心得.....	6
3.1 調查作業概述.....	7
3.2 調查作業前置準備.....	10
3.3 事故現場調查.....	12
3.4 可能肇因探討.....	18
3.5 非現場資料蒐集.....	23
3.6 事故分類與統計.....	24
3.7 航空器材料概要.....	26
3.8 直升機飛行原理.....	28
3.9 事故樣態與生還因素.....	29
3.10 Robinson Helicopter 工廠參訪.....	40
3.11 實機殘骸檢視演練、.....	44
3.12 真實案例研討.....	47
四、建議.....	47

摘要

本次直升機事故調查訓練係參加由美國南加州大學維特比工程學院航空安全及保安學程(Aviation Safety & Security Program, Viterbi Engineering School, USC)常年開設之直升機事故調查課程(Helicopter Accident Investigation, HAI)，採用實體課程方式進行，內容涵蓋 3 大面向及 12 子項，包括：一、直升機事故調查 - 1.調查作業概述、2.作業前準備、3.事故現場作業、4.可能肇因探討、5.非現場資料蒐集、6.真實案例研討；二、直升機技術概要 - 1.事故分類與統計、2.航空器材料概要、3.直升機飛行原理、4.事故樣態與生還因素；三、調查實務與參訪：1.實機殘骸檢視演練、2. Robinson Helicopter 工廠參訪。經由課程講座深入淺出的教學與真實案例研討，參訓者得以瞭解直升機調查過程中的關鍵要項與程序，具備初步的直升機事故調查能力。

一、目的

航空器事故調查係屬綜合職能，於現有公務及各航空體系中並未具備此類專業人員，國際民航組織亦闡明，航空事故調查員的訓練需包含初始訓練、在職訓練、基礎訓練、及以專業訓練為基礎的進階訓練。直升機事故調查課程即屬進階訓練項目，係專為具航空器失事調查經驗人員設計，提供有關直升機事故調查所使用的程序、方法以及技能，並透過相關事故案例進行演練以強化對於調查過程中關鍵要項與程序的瞭解。

本次直升機事故調查訓練係參加由美國南加州大學維特比工程學院航空安全及保安學程(Aviation Safety & Security Program, Viterbi Engineering School, USC)常年開設之直升機事故調查課程(Helicopter Accident Investigation, HAI)，採用實體課程方式進行，內容涵蓋 3 大面向及 12 子項，包括：

- 一、**直升機事故調查** – 調查作業概述、調查作業前置準備、事故現場調查、可能肇因探討、非現場資料蒐集、真實案例研討；
- 二、**直升機技術概要** – 事故分類與統計、航空器材料概要、直升機飛行原理、事故樣態與生還因素；
- 三、**調查實務與參訪** – 實機殘骸檢視演練、Robinson Helicopter 工廠參訪。

二、過程

本次 HAI 訓練課程係前往美國加州 USC Viterbi Engineering School, Aviation Safety & Security Program 設於洛杉磯市 LAX Airport 區的課程教室及 Alhambra 區的飛安實驗室(Aviation Safety Lab)，採實體課程方式辦理。其中，與調查工作的準備、程序、文件、原理、案例研析等等係於課程教室講授、研討；而事故現場作業模擬、殘骸檢視演練部份則是在實驗室進行。訓練期間依照美國加州的作息時間(太平洋標準時間，GMT-8)，於 2022 年 10 月 31 日至 11 月 04 日、每日上午 8 時至下午 4 時間進行講授、演示。授課期間講座運用了大量的實際案例影片輔佐說明，不僅加深學習印象更提昇了學員聽講的專注能力。

以下分別就授課講座及課程安排作一概述：

2.1 授課講座

本次訓練針對直升機事故調查、直升機技術概要分別邀請了二位資深講座進行授課。其中，直升機事故調查部份由 Robert J. Rendzio 先生主講。Mr. Rendzio 在旋翼和固定翼航空器的飛行時間均超過 5,000 小時，具有豐富的軍用直升機和商用直升機飛行經驗。在美國陸軍服役期間，他專門研究航空安全，並以鹵化物滅火技術專家著稱，並被認為是架空電纜線危害防護系統(Wire Strike Protection System)的領域專家。Mr. Rendzio 先生對直升機的各种系統，包括架空線偵測系統、渦輪發動機、傳動系統、尾桁及穩定器等等都非常熟稔，並曾受美國陸軍安全中心指派辦理 UH-60 事故之飛行數據記錄器 (FDR)分析。目前 Mr. Rendzio 受美國聯邦民航局(FAA)任命為飛航規則制定諮詢委員會 (ARAC)的旋翼機乘員保護工作小組(ROPWG)的投票成員，同時也是國際飛安調查員協會(ISASI)美國東南地區分會主席。



圖 2.1 HAI 直升機事故調查授課講座 Robert J. Rendzio

直升機技術概要則是由 John P. (Jack) Cress 先生主講，為美國南加州大學直升機事故調查訓練課程的首席講座。他曾在美國海軍陸戰隊服務 24 年，擔任 H-46 直升機維修員及飛行員，累積近 4000 小時的飛行時數，並兩度受派至美國海軍航空安全學校，講授直升機空氣動力學、基本結構失效分析等課程，並協助美國海軍陸戰隊的飛航事故調

查與事故預防計畫。Mr. Cress 為俄亥俄州立大學航空工程學士（1967 年畢），以及美國海軍研究院航空工程碩士（1979 年畢），自 1979 年起即參與美國南加州大學直升機事故調查課程(HAI)的教學工作至今。而在教學工作之外，Mr. Cress 也是 Vortechs Helicopter Analytics 公司的負責人，提供各類型商用和軍用直升機相關事故的調查、教學和諮詢服務。



圖 2.2 HAI 直升機技術概要授課講座 Jack Cress

2.2 課程安排

訓練期間之課程配當表詳如表 2.1 所列。

表 2.1 2022 USC Viterbi HAI 訓練課程配當表

日期 / 時間	講題
<p>Day 1 2022/10/31</p> <p>0800-0900</p> <p>0900-1000</p> <p>1000-1100</p> <p>1100-1200</p> <p>1300-1400</p> <p>1400-1500</p> <p>1500-1600</p>	<p>開訓式、講座介紹、課程說明、學員介紹</p> <p>調查作業概述</p> <p>調查作業前置準備</p> <p>事故分類與統計(1)</p> <p>事故分類與統計(2)</p>
<p>Day 2 2022/11/01</p> <p>0800-0900</p> <p>0900-1000</p> <p>1000-1100</p> <p>1100-1200</p> <p>1300-1400</p> <p>1400-1500</p> <p>1500-1600</p>	<p>航空器材料概要(1)</p> <p>航空器材料概要(2)</p> <p>事故現場作業(1)</p> <p>事故現場作業(2)</p>
<p>Day 3 2022/11/02</p> <p>0800-0900</p> <p>0900-1000</p> <p>1000-1100</p>	<p>實機殘骸檢視演練</p> <p>直升機飛行原理(1)</p>

日期 / 時間	講題
1100-1200 1300-1400 1400-1500 1500-1600	Robinson Helicopter 工廠參訪
Day 4 2022/11/03 0800-0900 0900-1000 1000-1100 1100-1200 1300-1400 1400-1500 1500-1600	 直升機飛行原理(2) 事故樣態與生還因素 可能肇因探討 非現場資料蒐集
Day 5 2022/11/04 0800-0900 0900-1000 1000-1100 1100-1230 1230-1300	 案例研討：N851BP Accident 分組討論(1) 分組討論(2) 分組報告(1) 分組報告(2) 結訓式

三、訓練課程重點摘要與心得

本梯次 HAI 之訓練總計有來自 8 個國家的飛航安全或事故調查相關單位、共 28 位學員參與訓練，其中又以美國（8 位）、哥倫比亞（7 位）的學員人數為多。講座並將學員編成 6 個小組，以利分組進行案例研討。

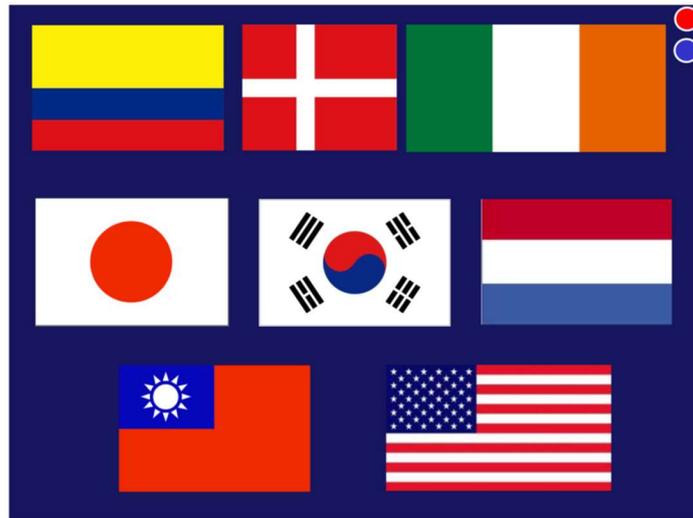


圖 3-1 參訓學員所屬國家之國旗



圖 3-2 南加大飛安學程辦公室



圖 3-3 上課教室一景



圖 3-4 上課實景



圖 3-5 餐敘交流



圖 3-6 頒授結業證書

課程中所使用的各項教學材料，包括講義、投影片、探討案例、影片等等資料，於訓練完成後均存放於 1 只 USB 隨身碟中提供予每位參訓的學員，實為 USC 十分貼心的服務。在此謹將訓練過程中各項課程主題之重點內容摘要與心得彙述如下：

3.1 調查作業概述

辦理直升機事故調查過程中，除了需具備與旋翼航空器有關的調查技巧外，對於人為因素、材料特性、空氣動力、現場作業與內業分析、以及報告撰擬都要能夠有相當程度的瞭解與掌握。因此，調查作業乃是一綜合性的專業技術，需要透過訓練及複訓不斷的強化熟悉，才能確實釐清調查的重點方向並提出適切的改善建議。本節課程針對調查作業提出一概括性的介紹，使學員瞭解調查的範疇、依據及相關法規，並藉由真實案例來初探調查作業中對於釐清事件發生順序的重要性。

飛航事故的發生，通常與資源／資訊的不足或不及時、組員個人行為、標準化程度不足、操作／環境狀態的複雜度、材料因素、以及商業市場的影響有關。是以，在眾多的待蒐集、可能與事故有一定程度關聯的資訊／資料中，調查人員必須能夠靈活的運用各項與飛行安全有關的訊息，例如非適航／有條件的故障訊息、適航指令、飛安公告、安全問題報告、以及在直升機領域中常見的各種文件資料。在調查作業過程中，最重要的就是必須保持客觀，根據事實作陳述，不可被事故現場的第一印象或是外在的樣貌給框限了，並且要綜觀全局而非執著於單一因素。

緊接著講座就帶領學員透過 2003 年發生在美國佛羅里達州北棕櫚灣郡普通航空機場、一件 Robinson R-22 直升機與 Piper PA-25 固定翼小飛機空中擦撞的事故，來演練事故資料計算工作對於釐清事件細節發生順序的助益，同時也探討美國聯邦法中有關「航行路權 (Right of Way)」的規定。此案例中，R-22 正由飛行訓練教師進行模擬發動機失效採行自轉下降(Autorotation Decent)落地的演示，而 P-25 則恰巧在拖曳一架滑翔機起飛昇空，雙方的飛行員都表示是對方撞上來的，而相關目擊者的訪談資料也呈現二種不同的說法，因此透過數據計算乃唯一可釐清事件發生順序的方法，其中航空器的速度更是關鍵的因素。由 R-22、PA-25 性能數據以及事發當時操作狀態，可以分別計算得出 R-22 的速度為 65 knots、PA-25 為 55 knots，顯然是速度較快的 R-22 由後方追上速度較慢的 PA-25，此時事發高度約在 70 英尺間，對照滑翔機於事發當下緊急脫鈎自主滑降落地的距離回推初始高度約 50 英尺、而拖機與滑翔機於起飛爬昇階段的高度差約 20 英尺，可驗證數據計算結果應屬準確。然而，講座也提醒學員們，上述練習只是初步的概算，如果要深入探討則必須將大氣環境（如：風、氣溫、氣壓、溼度）、飛機性能（如：機齡、引擎出力、載重平衡）、操作（如：飛機外型、舵量）等等諸多的影響因子考慮進來，才是完整的分析。

在法規部份，美國聯邦法規中有關「航行路權 (Right of Way)」的規定係登載於第 14 章第 91 節(14 CFR Part 91)之飛航作業規則(General Operating and Flight Rules)中的第 113 條，當中「(c) In distress」陳述遇險航空器具優先通行路權；「(d) Converging」陳述正在執行拖機或加油機任務之航空器具優先通行路權；「(g) Landing」陳述已進入落地之最後進近階段(final approach)或即將落地之航空器具優先通行路權。對比事故案例，

R-22 係執行模擬發動機失效之演練，且進入落地階段，理應具有優先通行路權；然而當有空中接近情況時卻是正在拖機的 PA-25 有優先通行路權，形成路權判斷的盲點。由於看法各有不同，這部份講座就留給學員們作為休息時間的討論話題。



圖 3.1-1 探討案例之現場鳥瞰圖

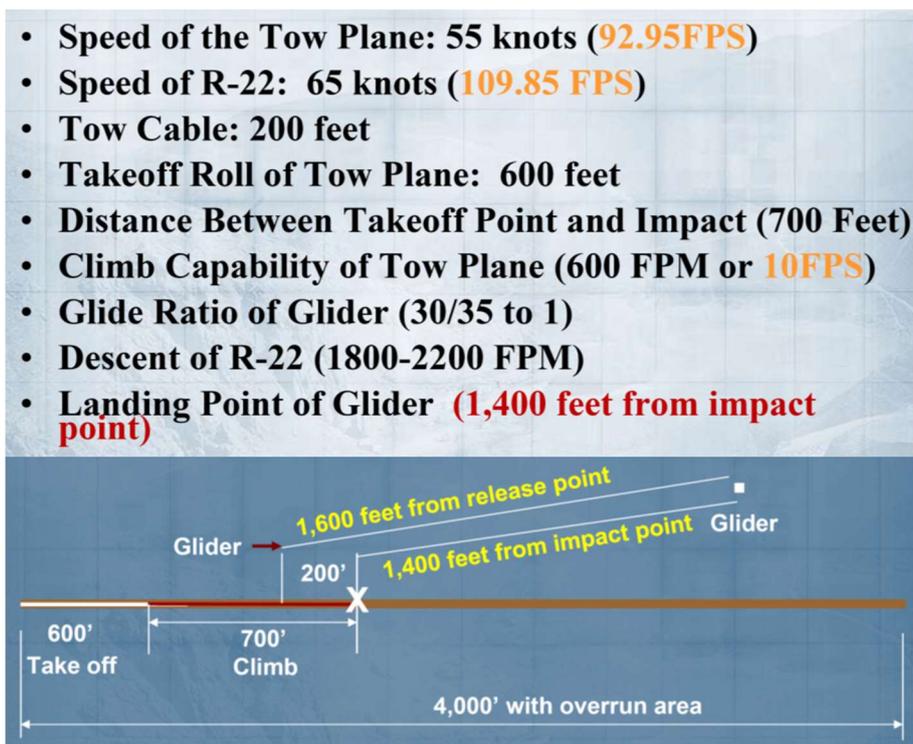


圖 3.1-2 探討案例之計算參數與附圖

3.2 調查作業前置準備

事故調查的目的，是為了防止類似的事件再度發生。是以，在調查作業的過程中要透過反覆詰問：「發生了什麼事？」「為什麼會發生？」這兩個問題，來找出事故的可能肇因，以及系統上未能及時、有效地防止危害／風險演變成事故的缺漏或不足，而後者正是調查成果的建議事項中須詳加著墨之處。

事故調查作業的前置準備，旨在確認調查工作要探討的基本要項、需蒐集的相關事實資料、擬訂報告的架構格式、以及建立初步的事件序列表(Timelines)。一般而言，直升機事故調查作業會探討的基本要項不外乎人為因素、材料因素、環境因素等 3 大類，在進行事實資料蒐集時就必須納入考量，作為事故現場作業、訪談、零件功能檢測與材料試驗的執行內容。有關現場作業部份將於次節中詳述，而蒐集到的事實資料，包括調查過程發現的事實、法規、試驗報告與參考資料等，將會編整為事實資料報告，作為事故調查的基礎，以及後續事故肇因分析探討的依據。事實資料報告中的陳述，均應緊扣相關資料、數據與來源依據，完整且清楚地交待事實內容，避免評斷式的語句或太過簡化的描述。範例如圖 3.2-1 所示。

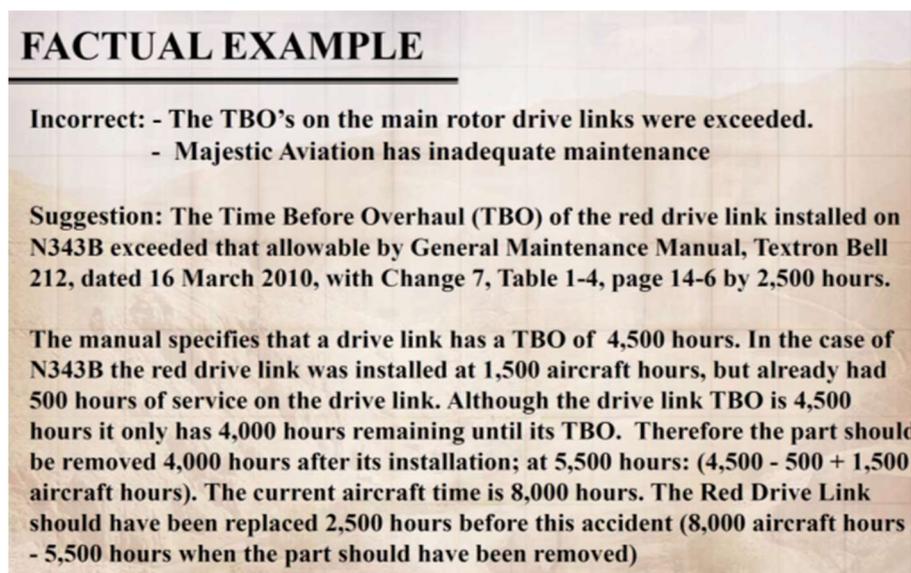


圖 3.2-1 事實資料報告陳述範例

有關報告的架構格式部份，通常包括：事實資料、分析、結論、建議等 4 章，講座藉由某 Agusta A-109E 型直升機事故案例帶領學員一同演練查找相關事實資料的過程，最後並彙總出典型的事實資料報告架構大致會涵括下列小節：

- 飛航經過
- 其他損害
- 天氣資料
- 場站資料
- 醫療與病理
- 測試與研究
- 人員傷害
- 人員資料
- 助導航設施
- 飛航紀錄器
- 火災
- 組織與管理
- 航空器損害
- 航空器資料
- 通信
- 殘骸與撞擊資料
- 生還因素
- 其他資料

上述分節之架構係與 ICAO Doc. 9756 “Manual of Aircraft Accident and Incident Investigation, Part 4, Reporting” 規範第 1 章及附錄 1 所列之標準化格式內容一致。由於事故中每一事件發生的順序對於後續的分析作業有著關鍵的影響，通常在「其他資料」一節中會放入事件序列表，將事故中的各個事件發生的時序陳列出來，以課堂案例作為例子可以整理出如圖 3.2-2 的事件序列表。其中，在不同的時間區段，可以因應事件的細節陳述需求來調整時間的間隔單位，以能完整說明事件的每個環節為考量。

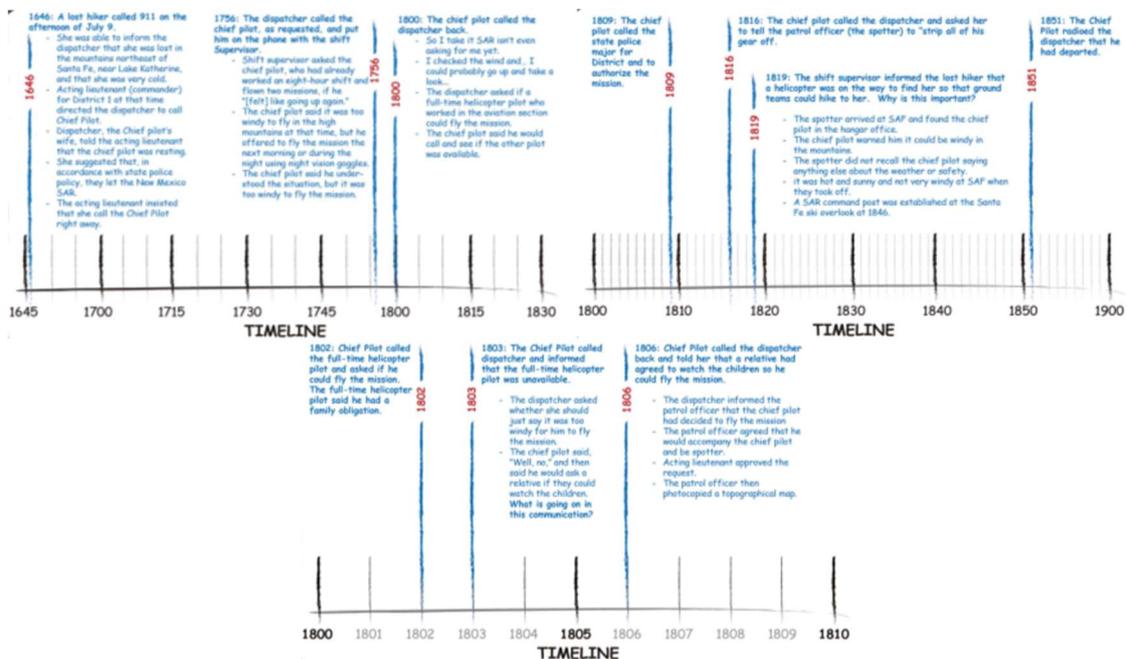


圖 3.2-2 案例事故之事件序列表

當事實資料的蒐集告一段落，接續就是要進行分析，即詳細的檢查比對事實資料中看似複雜的每個項目並瞭解其本質，再將這些事實拼接起來、試著重建事故，並專注在引致事故的核心問題上，找出真正的事故肇因。這個部份應是整份調查報告中最能令人信服的篇章，之後就會進入結論以及建議。結論是由分析的結果整理得出，陳述「發生

了什麼事」、以及「為什麼會發生」，文句以精簡扼要為度。建議則是要針對結論中述及的發生原因，針對有關的機關（構）分別提出其需要改善的事項，至此即為完整的調查報告架構。

3.3 事故現場調查

綜觀事故調查的作業流程，概分調查作業前置準備、事故現場調查與非現場(off-site)資料蒐集、可能肇因分析、報告產製等 4 大階段，其中事故現場調查與非現場資料蒐集皆屬於事實資料蒐集的過程，而事故現場作業更是最直接、可以即時獲取第一手資料的階段，也是最重要的部份。在課程中講座將事故現場調查分為四大部份作講解：前往現場、殘骸盤點與繪圖標記、攝影、以及蒐證重點項目等，摘要分述如下：

一、前往現場

當接獲事故通報時，第一要務就是聯繫相關人員、儘可能在最短的時間內抵達現場，因為有許多的蹟證是具有時效性的，例如：流體(油類)、易腐物品、撞擊或火災痕跡、證人的記憶等，必須及時加以保存、紀錄。此外，與人為因素有關的一些資料，像是對飛航組員的檢查和座位、生物樣本（藥物、酒精）、文件、紀錄或日誌等等，也必須儘快的掌握。其中，在文件、紀錄或日誌部份通常會針對下列各項進行蒐集：油單、飛行計畫/日誌、航管訊息、重量與平衡、航圖/儀器進場圖、天氣資訊、維護日誌、飛行員日誌等。這些文件在蒐集上經常會遭遇水浸、火燒的狀況甚至有被替換的可能，因此必須確實的保全。

在啟程前往事故現場之前，因應蒐證需求要作好相關物品的準備，常見的有：防穿刺手套、安全鞋／靴、防護面罩、防護衣、護目鏡／太陽眼鏡、消毒用品、防曬或防寒裝備、飲用水等。同時也要取得事故地點／殘骸的位置資訊，預備好當地的地形圖、航拍照片、以及包含鄰近區域的交通地圖以期順利前往。

二、殘骸盤點與繪圖標記

初抵現場時，首先須以目光環顧事故現場，對於事發地點及其週邊環境有一概括性的掌握，接著就是一邊攝影、一邊紀錄。攝影部份於後段分述，紀錄部份則有

殘骸盤點與繪圖標記兩大要項。殘骸盤點係指於現場就事故航空器的主要部件進行盤點，如圖 3.3-1 所示，目的在於確認各項部件於事故前均無逸失的情況，並且可以留待後續視需要進行檢查、試驗或測試。而事故現場的繪圖標記，其目的則是將事故現場以圖形的方式記錄下來，一方面期待能更清楚地瞭解事故的樣貌，二方面則是辨識現場的初始撞擊點、或是主/次要撞擊位置。常用的圖形型式有：基準線式、網格/方格式、極座標式，而一般會製作的圖形種類則包括：飛行路徑圖（平面、剖面）、殘骸零件分布圖、撞擊位置圖（平面、剖面）、目擊者視角位置圖等。講座沿用前節 Agusta A-109E 型直升機事故，舉例說明飛行路徑平面圖、以及撞擊位置剖面圖的製作，如圖 3.3-2、圖 3.3-3 所示。

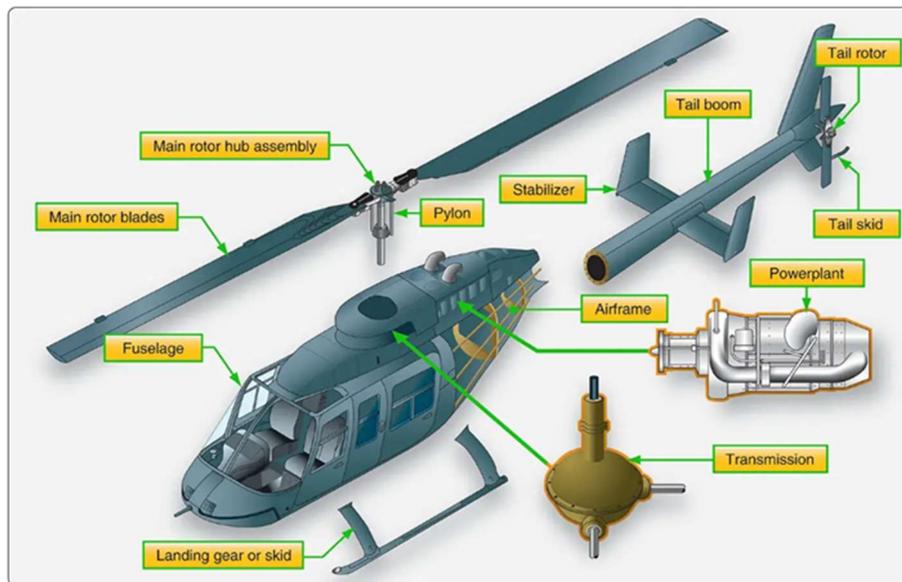


圖 3.3-1 直升機主要部件

而在目擊者視角位置圖部份，旨在標示目擊者當時所在位置、事故發生位置、以及週邊地景地物，嘗試還原事發當下目擊者與事發地點間視野、視角等相對關係，一方面用以整合不同目擊者對於所見事故過程的陳述，二方面也可藉以釐清不同陳述間的差異來源或疑點，儘可能的還原事故經過。目擊者視角位置圖的範例如圖 3.3-4 所示。

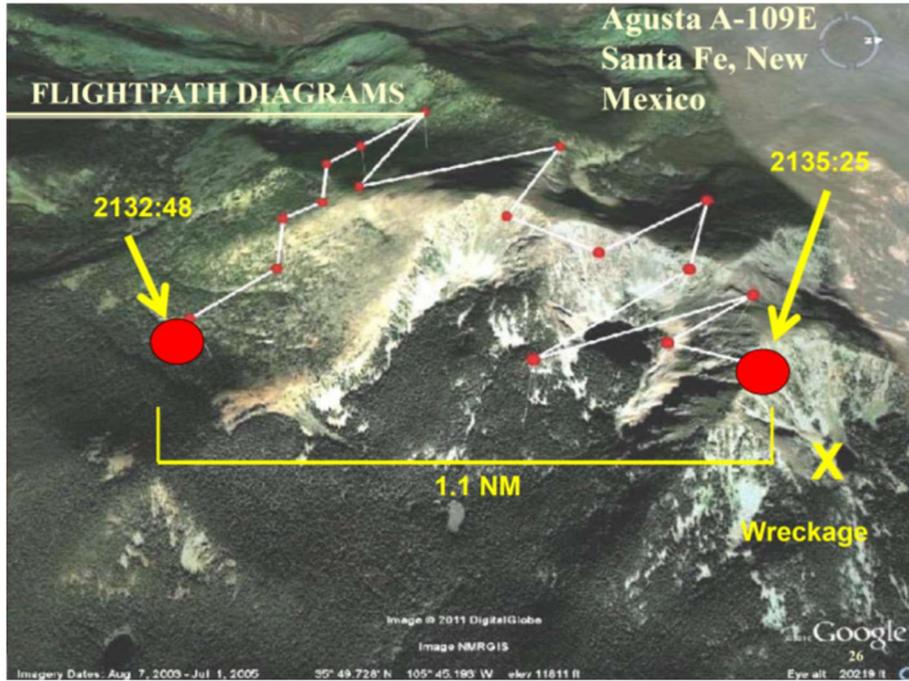


圖 3.3-2 飛行路徑平面圖範例

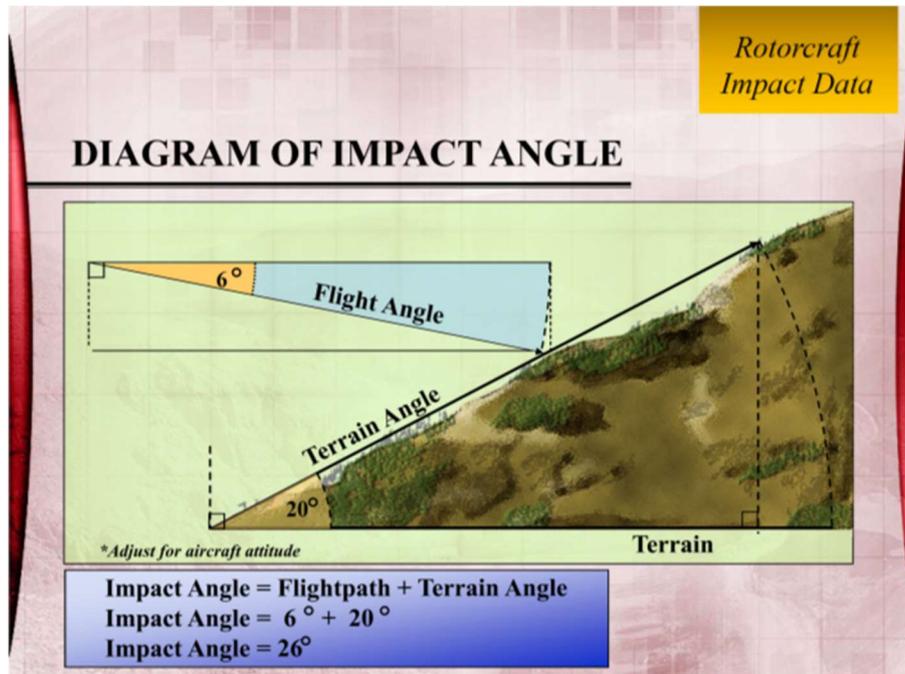


圖 3.3-3 撞擊位置剖面圖範例

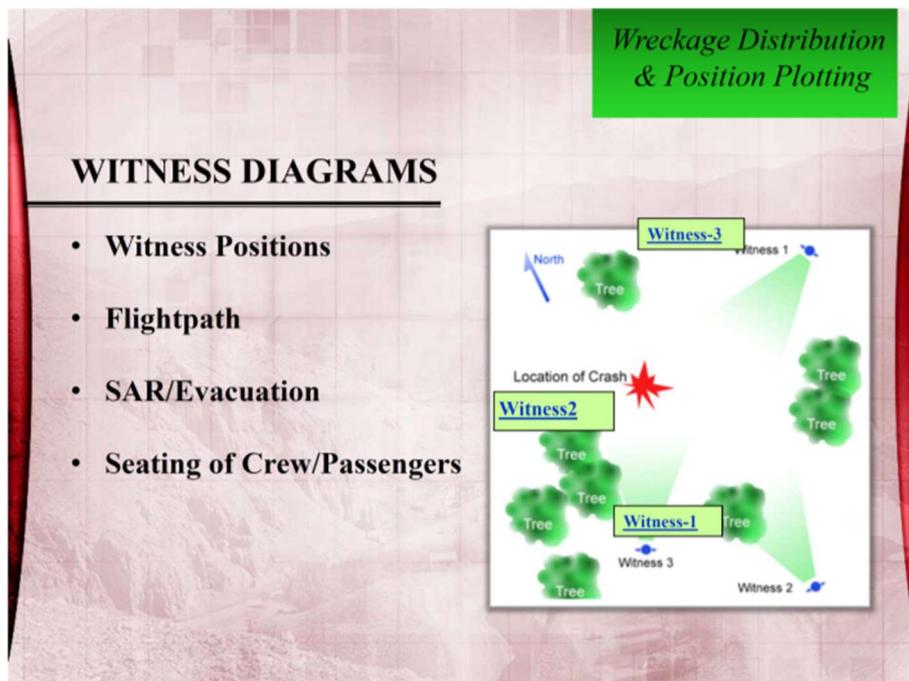


圖 3.3-4 目擊者視角位置圖範例

既然提到了目擊者，講座就順帶說明針對目擊者進行訪談時的注意事項。訪談要注意的三大基本要項是團隊成員、訪談地點、記錄方式。為避免造成受訪者的壓力，通常團隊成員不會超過 3 人；地點則是以輕鬆、無外界干擾、能夠讓受訪者感到安全的場地為佳；記錄方式通常會在取得受訪者同意下進行全程的錄音，事後再整理成文字稿件。一般在訪談中較常遭遇的狀況有：受訪者因害怕自證其罪或入人於罪而有所保留或隱瞞；將與事故有關的操作、決定或狀態合理化等。此外，訪談團隊若缺乏對事故相關因素的了解，過程中可能無法具體地提出關鍵問題致失焦，也會比較容易受其他目擊者陳述、媒體報導影響而造成觀點偏差。這些都是在訪談作業中要留意的。

三、攝影

於事故現場攝影之目的不外乎確認並記錄損壞的樣貌、記錄與原貌不同或可能因事故而改變的狀態、以及分享交換調查發現等。執行攝影作業時，作業的內容及建議的順序為：

1. 現場全貌：以能涵蓋與事故有關的所有位置方式取遠景，並按順時鐘方向分別於北、東、南、西四個方位廣角取近景

2. 地面路徑：順著地面路徑的方向廣角取景，重點處拍近照；
3. 鳥瞰圖：取鄰近的制高點、或是使用無人機空拍方式取景；
4. 航機外觀：採分段取景方式、按四個方位將整個航機外觀紀錄下來，並注意巨觀樣貌和微觀細節的取景對應；
5. 發動機/動力系統：按四個方位紀錄整體外觀，再就損壞細節放大取景。
6. 航機內部：針對飛行控制裝置、儀表板、故障零件、組員及乘客位置、駕駛艙及客艙狀況取景；
7. 證人所在位置、視角
8. 相關文件

取景時，通常以背景單純、對比清晰為基本原則，以確保成像的品質和可判讀性。同時，在取景範圍中應放置適當的標示或說明，如：方位、物體名稱、比例尺等等，以利日後的整理分析。

除了調查團隊成員外，還有其他的單位或是個人也有可能是在事故發生的過程、當下或是後續處理中有拍攝相關影像，例如：新聞媒體、證人、檢調單位、警察局、消防局、法醫、機場公司或類似機構等等，在蒐集資料時可以洽請提供。



圖 3.3-5 背景對比及物體標示範例

四、蒐證重點項目

講座依其過往的調查經驗，特將事故現場調查過程中的蒐證重點項目提示如下：

1. 機身與零件損壞：此部份通常包括機身結構（蒙皮、桁梁及隔板）、鉚釘、管、軸、纜，須記錄其外觀、變形狀況（拉伸/壓縮/彎折/頸縮/斷裂/破碎...）、斷面細節與紋理（平整/粗糙/海灘紋...）、氧化/分解及腐蝕現象等。
2. 旋翼系統：包括主旋翼及尾旋翼總成（葉片、槳距連桿、轉軸...）、控制總成（旋轉盤組、飛輪單元...）的損害狀況，並判斷其轉速狀態。
3. 動力系統：包括發動機、齒輪箱、變速箱、傳動軸的損害狀況，判斷是否有受到外物入侵損傷（Foreign Object Damage, FOD）情形，並結合油門/節流閥位置、排氣部件溫度判斷轉速狀態，同時結合機身結構的衝擊變形方向與渦輪葉片、輪盤或齒輪的損壞型態判斷衝擊能量的高低。
4. 火災：確認火災的生成要素（燃料、空氣、火源和環境狀態）、掌握組員及乘客的目擊陳述、尋找未受碰撞後起火影響的部件狀態（煙燻/熱變色/金屬噴濺...）以確認火災發生與事故的關聯。
5. 複合材料：瞭解外觀（燒焦/污點/凹痕/穿透/磨損/碎裂...）以及構造（分層/剝離/空隙...）的狀態，研判與事故的關聯。常用敲擊法或超音波探傷儀檢測。
6. 紀錄器、儀錶與指示燈：如有飛航紀錄器，應立即取得並送交實驗室進行資料的下載與解讀。儀錶部分則應包括現場的攝影記錄，並將重要且明顯受損者後送至實驗室進行拆解分析以瞭解其損壞的原因、可能發生的時機與當時航機狀態。指示燈如為燈絲型式的燈泡，則可經由燈絲的狀態來判斷事故當下該燈號是否為點亮狀態（延展伸長），以及衝擊力的方向。
7. 殘骸保存與重建：在完成事實資料蒐集前，事故殘骸應予妥善保存。當研判事故的發生可能與機身結構材料失效有關聯時，則需進一步考量以樣架組裝（mock-up）方式進行結構重建，以瞭解組件、裝配和零件可能的失敗原因，如：

超載/衝擊、組員操作、外部環境、疲勞、設計/製造、維修、應力/應變、化學反應等等。

3.4 可能肇因探討

在美國，直升機的使用是非常廣泛而頻繁的，從個人、商務、運輸到軍事用途，各式各類的直升機處處可見，當然也累積了許多不同型態的事故資料，其中又以人為因素、航機性能、材料因素為最常提出的可能肇因探討方向。

一、 人為因素

人為因素探討的範圍非常廣泛，在事故調查相關訓練中也有專門的課程加以探討，本課程中僅就講座於直升機事故調查的參與經驗提出分享。一般飛行任務的執行，其決策、過程與結果主要受到：任務需求、風險管理、組員狀態等 3 個層面的因素影響。首先，飛行員會接受、並且能接受任務的指派並執行，最基本的要求是「符合資格」，也就是在證照、經驗、訓練的資歷、紀錄與相關限制條件上都充分滿足派遣的需求。其次則是與個人的人格特質和操作技術、組織的文化、組員體力與耐力有關。當任務需求與條件相符、具備啟動執行的基本要素時，就會進到第 2 個層面作風險的管理，尤其是當遇有不利的天候、地理環境或組員狀態時，更須審慎評估承擔部份風險來完成任務所獲致的效益，以確定任務的可接受性。是以，執行單位須制定風險控管的制度與程序，並採行風險控管措施以降低風險致災的程度。在作法上，迴避或是避免進入風險情境是最佳的選擇，可以完全消弭危害的影響。當風險情境無可避免時，則需要提供對應的操作程序以控制危害，同時也要對相關人員進行危害識別與迴避的訓練，有效降低危害發生的可能性或是嚴重程度。

組員狀態對於任務執行過程的良窳、執行結果的成敗具有決定性影響，而態度表現、疲勞程度與壓力狀態與生理概況是評估組員狀態的四大面向。在態度表現方面，組員對於執行任務所反映出來的態度是評估的基準，講座列舉有害的態度以及對應的可能解方如表 3.4-1 所示。疲勞程度方面，則可運用人為因素課程中所提供的組員疲勞量表進行評估，於本課程中不再贅述。壓力狀態方面則可分為自感壓力 (Self-induced Pressure) 以及情境壓力 (Situational Stress)，多與任務使命/目標、執行

節奏、操作風險、環境條件（天氣/早晚）、支援系統（通訊、導航）有關，可經由訪談、派遣紀錄、通聯紀錄等等作綜合評估。最後，生理概況則包括了執行任務前的身體素質評估、藥物服用紀錄、酒精反應測試，以及任務執行中是有否產生視錯覺(visual illusion)、缺氧情形的探討。

表 3.4-1 有害態度及對應解方

HAZARDOUS ATTITUDE	ANTIDOTE
Antiauthority “Don’t tell me!”	“Follow the rules. They are usually right.”
Impulsivity “Do something quickly.”	“Not so fast. Think first!”
Invulnerability “It won’t happen to me.”	“It could happen to me!”
Macho “I can do it!”	“Taking chances is foolish.”
Resignation “What’s the use?”	“I am not helpless. I can make a difference.”

針對人為因素的探討，講座沿用先前課程提及的 Agusta A-109E 事故案例，讓學員進行演練。其中，以組員狀態中的疲勞及態度表現為例，可以透過圖表方式彙整組員作息，以探討其疲勞程度與態度表現對事故的可能影響，如圖 3.4-1、3.4-2 所示。

二、 航機性能

直升機在操作的過程中，比較關鍵的有起飛、懸停(hovering)、爬昇、巡航(cruising)等四個階段，每個階段都需要航機能提供充足且適當的性能條件下才可以達成操作的指令要求，而性能取決於發動機的輸出功率和旋翼產生的升力。任何影響發動機和旋翼效率的因素都會影響性能，其中最主要的三個因素是氣壓高度、載重和風，而氣壓高度會受氣溫及溼度的影響。由於各項參數的計算十分繁複，於是就發展出了直升機的性能圖表，讓組員可以按照任務需求快速的查對，以瞭解在某種狀前提下航機的性能是否可滿足需求，或者須採行因應措施（如：減少載重）。

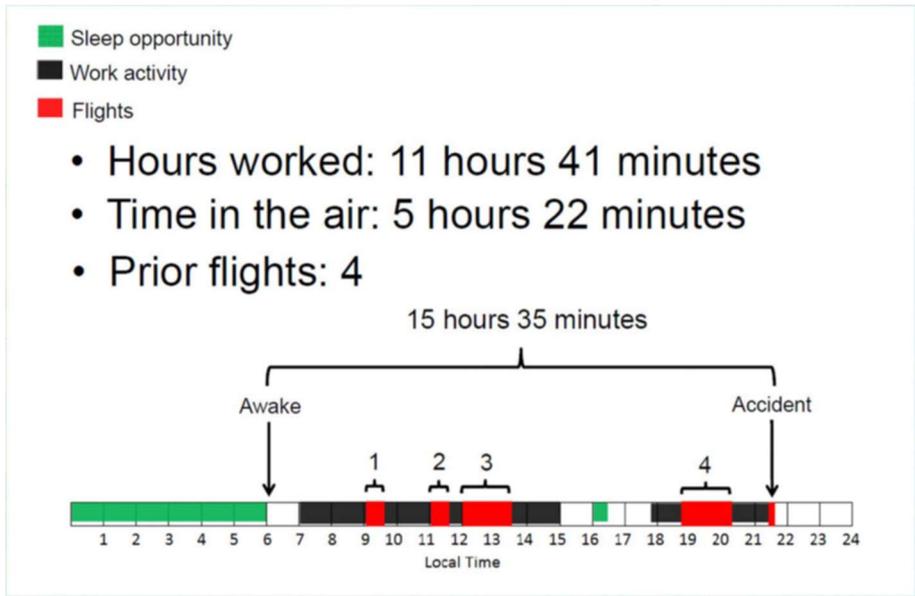


圖 3.4-1 Agusta A-109E 組員作息概況

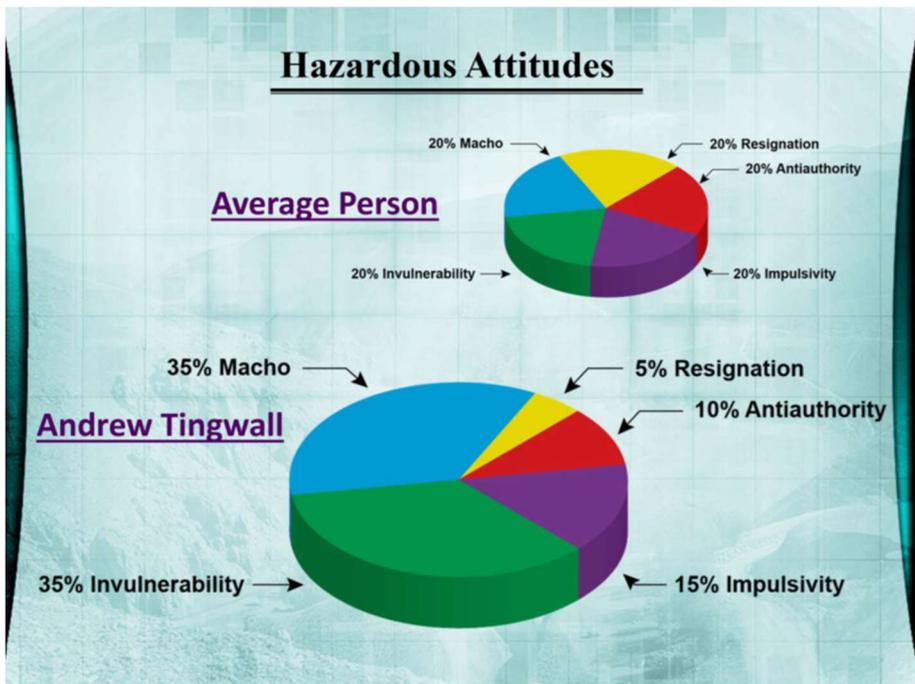


圖 3.4-2 Agusta A-109E 組員態度表現

於產製性能圖表時，飛機製造商會對直升機的狀況和飛行員的能力做出某些假設，通常是以直升機運作狀態良好、無風、發動機可達額定功率，且組員遵循正常操作程序並具備良好的飛行能力為前提。因此，在運用性能圖表時必須留意實際狀況可能造成的性能差異。課程中講座以懸停為例，教導並帶領學員運用性能圖表來推估某懸停高度下的最大載重，如圖 3.4-2 所示。

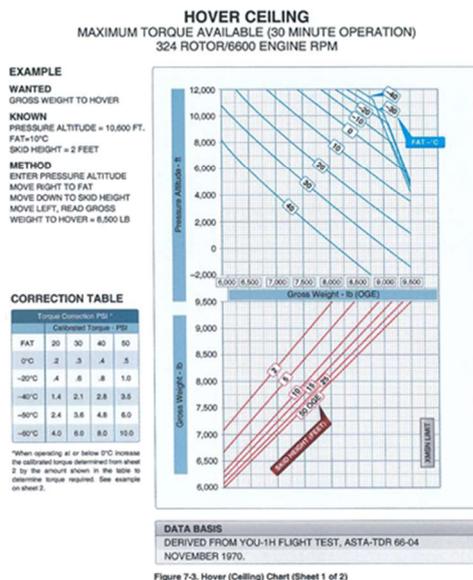
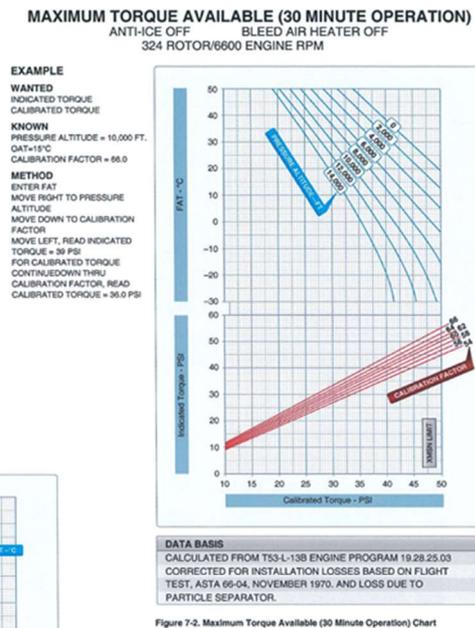
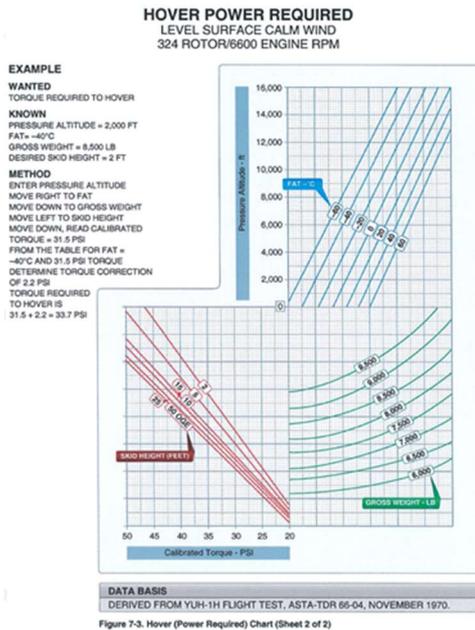


圖 3.4-3 直升機性能圖表範例

三、 材料因素

材料因素的探討方向主要有二，一是維護，包括管理、修護支援系統、維修紀錄、料件與作業程序、以及零組件使用紀錄等要項；二是結構，涵蓋生產、生命週期、標準與規範、以及動態特性等面向。本節中講座引用一旋轉盤組失效引致事故的實際案例作說明，係軍用直升機 AH-1 使用新式 Kaman 主旋翼片進行測試期間所發生的事故。該新式主旋翼片可較原型增加約 3 至 5% 的升力、以及約 500 磅的起飛荷載，於實驗室內進行全尺寸安裝及試運轉的結果均十分良好，然而於實機運轉測試時卻發生旋轉盤組嚴重磨損且斷裂失效的狀況，惟失效的旋轉盤組係具備 3000 小時的耐用時數，但案例卻發生在未達 200 小時的情況。經仔細調查始發現問題是出在旋轉盤組的滾軸支承上，因此料件係開發於 1957 年供 UH-1A 型直升機使用，無法承受新式 Kaman 主旋翼片增加的荷載，以致在甚低的使用時數狀況下即發生損壞失效。

MATERIAL FAILURE OR HUMAN FAILURE

1. Pilots were determined to not be a factor
2. Weather was excellent
3. Material
 - TBO for Huey swashplate and support assembly is 3,000 hours. (97% Achieve TBO)
 - The swashplate and support assembly in AH1's is 3,000 hours. (50% achieve TBO)
 - The swashplate and support assembly on AH-1 with Kaman blades is 3,000 hours; most fail before 200 hours. (0% achieve TBO)
 - Kaman blades provide additional 3-5 % in lift and will allow an increase in GTOW by 500 pounds.
 - Bearing support pack developed in 1957 for UH-1A.



圖 3.4-4 材料因素案例探討

3.5 非現場資料蒐集

在事故相關資料的蒐集過程中，非現場的資料蒐集是除了現場調查之外另一個重要的部份，通常包括：修護紀錄、氣象資料、證人陳述、生還因素、紀錄/報告/相關資訊、以及通聯紀錄等，其中證人陳述部份與第 3.3 節中的目擊者訪談雷同，故不贅述。

一、 修護紀錄

一般而言，如果事故肇因與維修有關，通常可以從飛行組員的操作或是修護紀錄看出端倪，而且多是屬於系統性問題而非單一事件，需要仔細地找出其根本的原因。知識、經驗與工具設備是影響修護品質的三大要素，知識可以透過教育訓練來增加，經驗可藉由工作的歷練以及觀摩來累積，工具設備則需要充分的投資以保持數量充足、型號適用、品質優良的狀態。

二、 氣象資料

氣象資料對於飛行有著極重要的影響，也是事故調查中必須探討、確認的一環。以美國而言，氣象資料的來源主要包括國家氣象局、聯邦航空局、軍方、以及新聞媒體，而資料的內容則會包括地面天氣報告、場站預報、高空風預報、地區預報等等，都需要與事故作結合分析並納入報告中。

三、 生還因素

生還因素的探討，目的在於透過充份的數據蒐集，以確認人為因素在事故中是屬於主要肇因還是次要肇因，並藉此瞭解和評估生理因素、心理因素對航空風險矩陣的影響。此部份資料蒐集的項目包括：船員/乘客受傷紀錄、驗屍報告、毒物報告、生理報告（體檢）、心理報告、外部資訊來源（如：社交媒體紀錄）等等。其中，受傷紀錄可與現場調查中有關座艙的部份結合作綜合性的比對分析。

四、 紀錄/報告/相關資訊

與事故有關的紀錄、報告或是相關資訊，以美國為例，其來源可參考民航局資料庫、美國國家運輸安全委員會(NTSB)、國際民航組織(ICAO)、美國聯邦航空管理局(FAA)、警察/消防/搜救單位、檢察機關、軍隊、或是私人管道等。

五、通聯紀錄

航機通聯紀錄的來源，不外乎飛航服務單位/民航局、軍方或是民間的頻道監聽電台，資料的項目則有飛航管制(Air Traffic Control, ATC)通話紀錄、導航台/雷達台座標接收紀錄、飛航軌跡自動回報紀錄等。

3.6 事故分類與統計

課程中對於美國旋翼機的事故率與統計有簡短的討論。綜觀 2012 年至 2022 年這 11 個會計年度的資料，大致來說每十萬小時的事故率大致維持在 3.5-4 之間，但每十萬小時的造成死亡的事故率則略有些許上升的趨勢。這樣的數字，對比民航運輸業的數字雖然較高，但若對比於美國普通航空業的固定翼事故率，差距則不明顯。

若檢視事故的類型，是以失去控制佔 33.6%的比例最高。在進一步探究直升機失去控制的原因，未做好直升機性能的管理 36.1%居第一位，其次是動態翻滾 14.5%、超過操作限制 13.3%、失去尾旋翼效應、受到干擾等等。這些事故成因或多或少都是因為未能遵循操作準則，或是疏漏操作時應該考量的條件，因此與人為疏失有所連結，這些事故的成因會擇要於後續章節進一步說明。

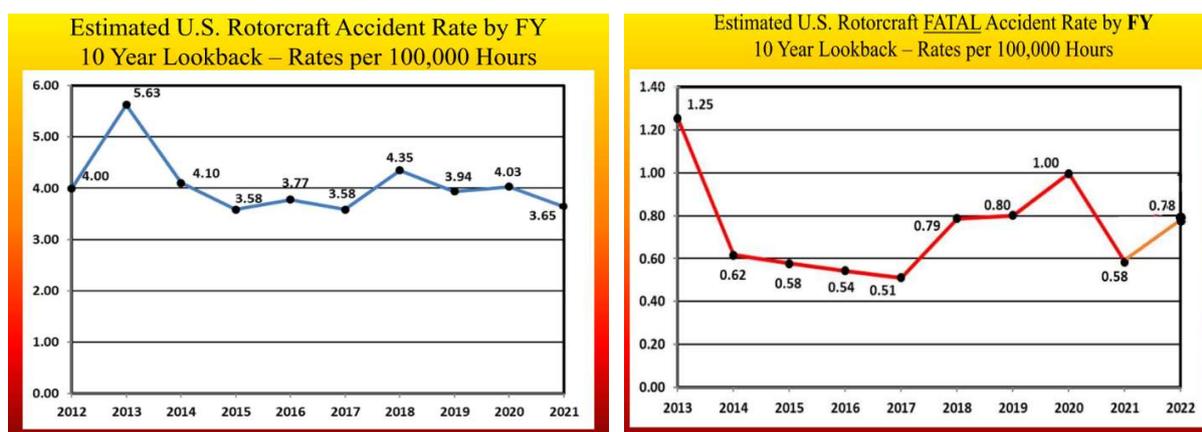


圖 3.6-1 2012-2022 美國旋翼機事故率及死亡事故率（每十萬小時）

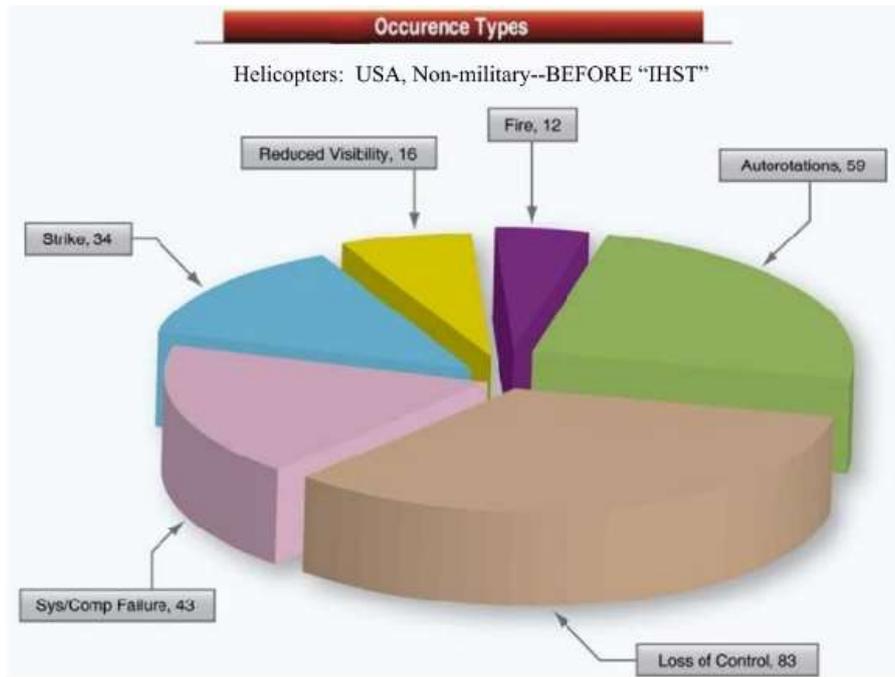


圖 3.6-2 直升機事故類型

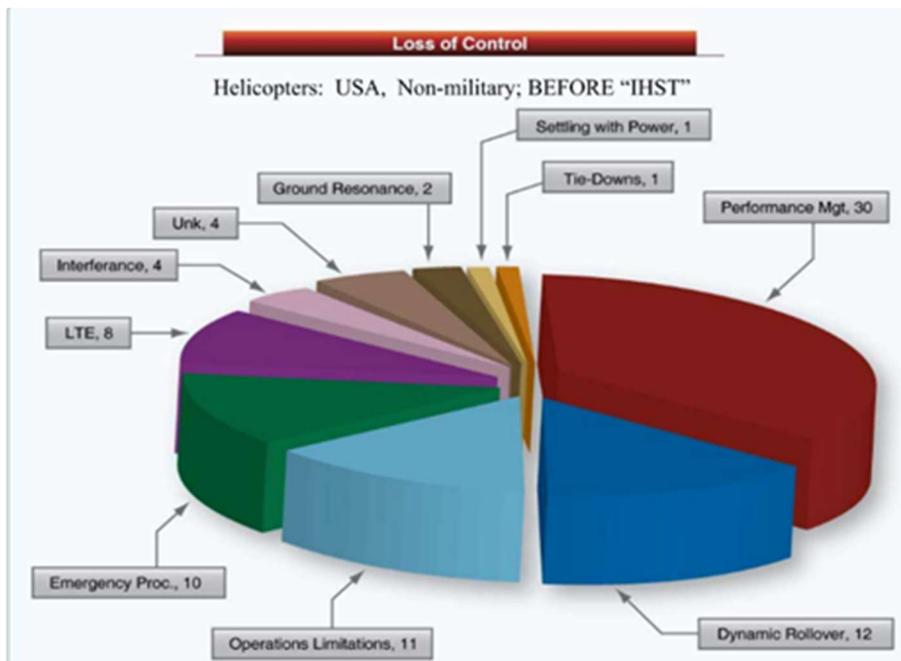


圖 3.6-3 失控事故之類別

3.7 航空器材料概要

航空材料是製造航空器機身、發動機、航電系統、航機內部設備等等所用的材料的統稱。由於航空器的特性，因此對於材料的要求相當嚴苛，要求重量輕的同時，也要求高強度與高剛性。一般提到航空材料，通常會較著眼於運用在航空器結構，及關鍵零組件如發動機等的特殊金屬材料如高強度的鋼材、鋁合金、鈦合金等，有機化合物材料如克夫龍（Kevlar），以及複合材料如碳纖維，玻璃纖維等。

過往提到航空材料，佔比最高的是鋁合金，常可達到全機重量的七成以上。然而複合材料技術的突飛猛進，使得複合材料在航空器上的使用比例也逐步提升。複合材料的運用除了降低了航空器的重量，較高的強度也使其得以運用在一些關鍵組件。以直升機來說最常見到複合材料的部件為旋翼，因為旋翼不僅對強度的需求標準嚴苛，同時還對重量限制有極高要求。除了運用不同材料，航空器材料還會以不同結構製造，在維持或提高強度的前提下，同時達到減輕重量的目的，最常見例子便是蜂巢結構的運用。

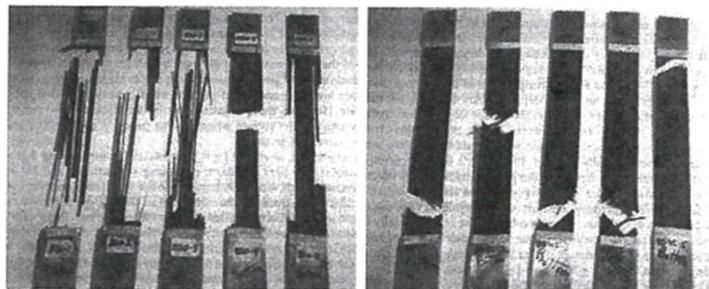
在事故中，零部件的破壞損毀狀況，也會因為材料特性而有所不同。例如金屬材質部件，最為常見的失效原因便是疲勞（Fatigue failure）。當部件受到重複或是忽大忽小的負載時，在經過長時間，便有可能會在一些部件因腐蝕或碰撞等缺陷處，發展為較大的損傷，當剩餘的區域不再能乘載所施加的負載，便會產生完全失效。斷裂面若存在疲勞紋或稱為“海灘紋”（beach marking），便可識別為疲勞失效。

複合材料是以兩種或兩種以上的材料經過複合工藝而製成的材料，不同材料彼此截長補短，使得複合材料的整體性能優於原組成材料。複合材料具有高強度、高韌性、質量輕、耐腐蝕以及耐磨耗等特性，但也由於材料不同以及製造的方式不同，使其失效特性極為複雜，同時微觀下的失效檢測也極為困難。如層狀結構的複合材料，受到拉力、擠壓、彎折、衝擊、疲勞而生成的失效模式各異；三明治結構在受到拉力、擠壓、彎折、衝擊、疲勞等影響又各自有不同的失效模式。所以在複合材料日漸成為航空器材料主流的今日，複合材料的失效檢測與預測也成為顯學。在課程中，由於這部分極為專業與艱深，因此對複合材料的失效，僅簡單介紹其失效樣態。不過由於使用複合材料的零部件在破損時，會產生極為細小的碎屑，而這些碎屑對於人體會

造成極大且不可逆的傷害，因此講座特別強調在檢視殘骸時，務必做好個人防護，以免對身體造成永久性的傷害。



圖 3.7-1 貝爾 206 型直升機主旋翼之蜂巢結構及疲勞紋



Tension failure in composites; macroscopically, even simple tension can produce fractures with a wide variety of features. Microscopic analysis is paramount (Ginty and Chamis, 1987).

圖 3.7-2 複合材料巨觀下的拉力所造成失效的樣態

3.8 直升機飛行原理

固定翼飛機產生升力的原理，是翼剖面與空氣產生相對運動造成機翼上弱下強的氣壓差，進而產生升力。若將翼片旋轉，使翼剖面與空氣產生相對運動造成旋翼上下面的氣壓差，同樣能產生升力，再透過旋翼的主軸拉動機身，使其可以克服重力實現飛行。這類以旋轉翼片產生升力的機種稱為旋翼機(Rotorcraft)，直升機便是屬於旋翼機中的一種，也是數量最多的一類；其他還有自轉旋翼機(Gyrocopter)、固定旋翼機(Gyrodyne)及傾轉旋翼機(Tiltrotor)。旋翼能夠產生的升力大小，取決於氣流速度和其旋翼水平投影面積的總和。若需要移動，以直升機來說是運用傾斜盤(swashplate)改變旋翼盤的傾斜角度，使旋翼所產生的升力軸向偏轉，即可產生移動直升機機體所需的推力。傾斜盤可以使旋翼盤作任意方向的傾斜，因此直升機能夠前進、後退或是橫移。

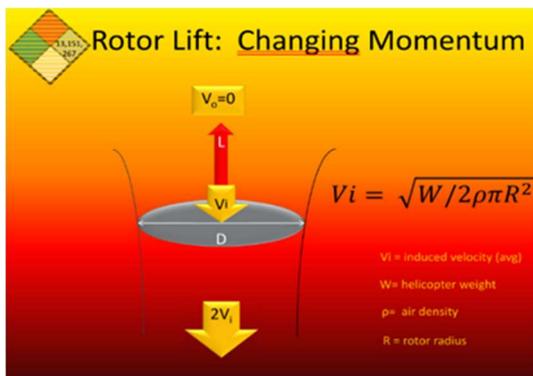


圖 3.8-1 旋翼產生升力之公式



圖 3.8-2 UH-60 直升機(credit :空勤總隊)



圖 3.8-3 B-234 直升機(credit :空勤總隊)



圖 3.8-4 Ka-32 型直升機(credit :齊柏林)

主旋翼系統的設計可分三種，分別是剛性旋翼系統(rigid rotor system)，半剛性旋翼系統(semi-rigid rotor system)，以及全絞鍊旋翼系統(Fully articulated rotor system)。而直升機的主旋翼配置有數種設計：單旋翼，雙旋翼以及多旋翼。其中單旋翼，也就是一般最常見的直升機外型，是目前直升機的設計主流。然而現今趨勢，多旋翼系統正在逐漸興起，多旋翼系統是控制不同組旋翼的轉速，以不同轉速改變姿態，達到飛行控制的目的。飛行員或操作者只需在操作介面輸入所需的動作指示，電腦即會控制旋翼轉速完成動作，因此操作上相對簡單，也與現有的直升機有很大差異。多旋翼系統主要應用的場合除了無人機外，還有現今各國積極發展，未來可能成為城市交通重要一環的UAM/eVTOL。雙主旋翼的配置，則主要是運用在較為大型的直升機，或是應對需要較大起飛重量的需求，其中又有嚙合旋翼(intermeshing rotors)，前後配置的串聯旋翼(tandem rotors)，如空勤總隊曾經使用的 B-234；或是同軸旋翼(coaxial rotors)，如台灣曾經短暫出現過的俄製 Ka-32。



圖 3.8-5 直升機懸停狀態

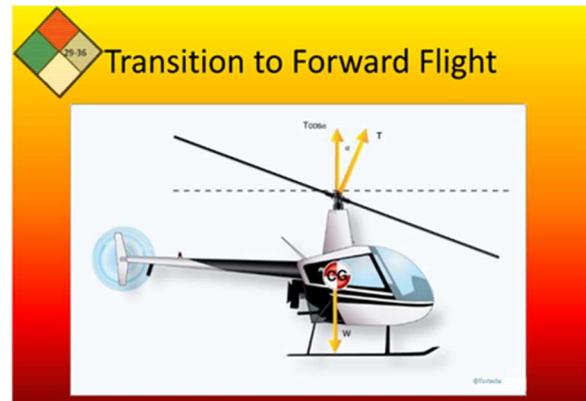


圖 3.8-6 直升機向前飛行狀態

如前所述，直升機是依靠旋翼片的旋轉產生與空氣的相對運動，在旋翼上下製造壓差，因此直升機可以做到一般定翼機所無法辦到的垂直起降、懸浮滯空、側向或倒退移動。但也由於旋翼的旋轉，在提供升力的同時，會由於角動量守恆定律，對機身帶來與旋翼的轉動方向相反、而角動量相等的反作用扭矩。為了讓直升機能夠平直而穩定地飛行，現行量產的直升機有幾種不同的設計，以平衡旋翼所產生的反扭矩。雙旋翼和多旋翼直升機，是採用一組或多組反向旋轉的旋翼，以不同旋翼所產生方向不同的扭矩相互抵消的方式，消除反扭矩。此外，雙旋翼或多旋翼機還能利用各個旋翼的轉速差別來改

變飛行狀態。而最為常見的單旋翼直升機，則是在機尾處設置旋轉方向為垂直的小型螺旋槳，以其所產生的推力抵消主旋翼所產生的反扭矩。這個小型螺旋槳設置的位置在尾桁的左側或右側，會造成尾旋翼是以推或是拉的方式抵銷反扭矩。

相比於一般開放式的小型螺旋槳，有另一種近似的設計，稱之為涵道尾旋翼 (Fenestron)，相比於一般的螺旋槳，涵道尾旋翼的優點如下：

1. 安全：在地面或接近地面操作時，被包覆在涵道內的旋翼，不僅提升了對地面操作人員的安全性，同樣也減低了旋翼碰撞異物的機率。同時，尾垂直翼為了裝置涵道尾旋翼，會較裝置傳統開放式尾旋翼的機種大上許多。所以在尾旋翼失效的情況下，較大的尾垂直翼可以提供直升機更多穩定性，也提高了操作的安全。
2. 操作優勢：雖然葉片數較小較多，但相較於傳統的開放式尾旋翼，可動部件如連桿等反而較少，因此也降低了故障發生的機率。同時這些葉片包覆於涵道內，再加上葉片有定子及轉子之分，因此產生的噪音與震動也較低。同時由於相對較為大型的垂直尾翼提供直升機較高的穩定性，所以飛行員於巡航飛行時，對操縱介面所需的操作輸入量也會較傳統尾旋翼少，在減低飛行員負荷有所助益。

然而涵道尾旋翼也有其缺點：不僅製造成本增加，也因為較大較重，會增加直升機的空重；同時較大的垂直尾翼外型也會增加飛行時的寄生阻力。同時涵道尾旋翼的效率要較傳統尾旋翼差，因此在起飛、降落以及懸停操作時，會需要飛行員輸入較大的操作量。



圖 3.8-7 AS-365 型直升機(credit :空勤總隊)

值得一提的是，現今各國所製造的直升機，其主旋翼的旋轉方向並非都是一致，法國及俄羅斯所製造的直升機，若由機頂俯視，其主旋翼旋轉方向為順時針方向轉，其他國家如美國、德國、義大利所製造的直升機，主旋翼則是逆時針方向轉。在直升機事故調查中，主旋翼的旋轉方向與事故發生時的直升機動態息息相關，在課程中講座即強調，調查直升機事故時，須注意涉事機型，並對其主旋翼設計，及尾旋翼的設計和位置有所了解。

直升機在飛行時，旋翼下方會有誘導流(induced flow)產生的下洗氣流，而旋翼尖同樣也會產生翼尖渦流，這些氣流會受風的吹移，以及彼此間的相互作用，而產生對於直升機操作上的影響。因此相對於定翼機，直升機飛行員有較多需要注意的地方。由於有相當數量的直升機事故，是因為直升機空氣動力上的特性所引致，故以下分點簡述一些直升機在飛行時特有的效應：

1. 旋翼升力差異及升力不對稱 (Dissymmetry of Lift)

翼剖面升力的產生，在邊界層分離之前是與經過翼剖面的氣流速度呈正相關。當旋翼旋轉時，靠近槳轂(rotor hub)處的旋翼通過的氣流速度較低，因此產生的升力較小；靠近翼尖處的旋翼通過的氣流速度較高，所以產生的升力較大，這即是升力沿旋翼分布的差異。因此當旋翼轉速提升時，翼尖升力增加會使旋翼受力上彎造成旋轉半徑變小，依照角動量守恆定律，會使得轉速更快。因此飛行員會需要做相應的操作控制。

升力不對稱是直升機向前飛行時，在旋翼盤的兩側，會因為旋翼運動方向與航機前進方向相同或相反，造成兩側升力有所差異。旋翼盤以旋翼與直升機運動方向的關係，可以分為前進旋翼片(advancing blade)及後退旋翼片(retreating blade)。前進旋翼片，因為旋翼片旋轉所造成的速度，會再加上機體前進的速度，造成通過前進旋翼片的氣流速度大，升力因而較大。後退旋翼片則是旋翼片旋轉造成的速度，需減掉機體前進的速度，使得通過後退旋翼片的氣流速度小，升力因而較小。所以直升機前進時，旋翼盤的升力分布會有所差異，進而造成直升機滾轉的趨勢。以主旋翼為逆時針旋轉為例，直升機前進時右側為前進旋翼片，左側為後退旋翼片，會造成右側旋翼片產生的升力大於左側旋翼片。

解決升力不對稱的方法是減少前進旋翼片的攻角，同時並增加後退旋翼片的攻角達到升力的平衡。要達到這樣的目的，可以使旋翼片拍擊(flapping)，或是在主旋翼旋轉過程調整葉片的攻角，亦即循環順槳(cyclic feathering)。

當前進旋翼片因相對風的速度增加而產生較大升力，旋翼片便因此抬升，不過抬升卻造成攻角降低，產生的升力也隨之變小；後退旋翼片剛好相反，旋翼片降低造成攻角增加，升力因此也增加。旋翼片這樣的上下運動稱為拍擊，類似昆蟲或鳥類翅膀拍動的動態。現代直升機的旋翼系統設計中，半剛性旋翼系統以及全絞鍊旋翼系統都允許旋翼片以槳轂為軸拍擊，藉此降低升力不對稱對於直升機操作的影響。循環順槳則是以機械設計調整旋翼片的仰角，進而達到調整升力的目的。

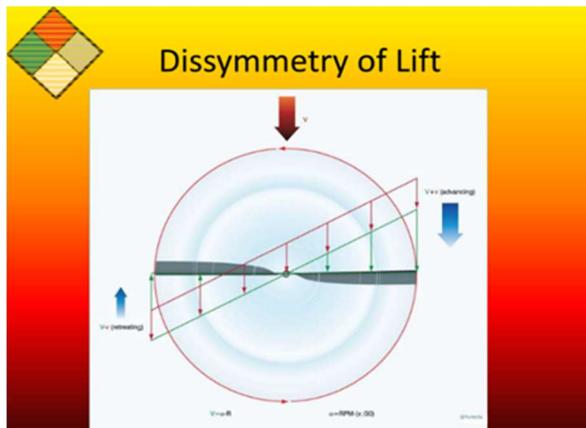


圖 3.8-8 旋翼升力不對稱示意圖

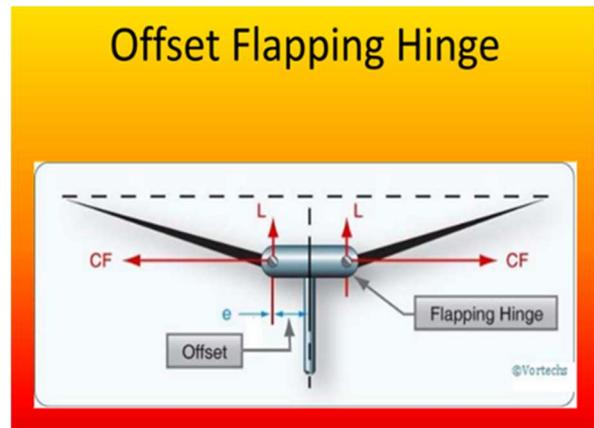


圖 3.8-9 旋翼 Flapping 樞紐示意圖

2. 橫向流效應 (Transverse Flow Effect)與傳導升力 (Translational Lift)

直升機在懸停時，在接近旋翼翼尖所產生的渦流，會滯留在翼尖旋轉軌跡上，形成渦流環(Vortex Ring)。若直升機開始向前移動時，前方旋翼的翼尖渦流會逐漸被直升機前進時的氣流帶離旋翼，進入旋翼的空氣會逐漸“乾淨”，也就是不再受渦流的影響，這時候有兩件事會依序發生。首先，在直升機前方的旋翼區域，其翼尖渦流雖然會被帶離旋翼，但在後方的旋翼其翼尖渦流仍然會存在，所以旋翼經過的區域會有一部分是穩定的氣流，有另一部份是擾動的氣流，直升機會因此產生震動。同時由於前方方向端的阻力降低了，經過迴轉偏移(Gyroscopic Precession)會在

旋翼轉 90 度的位置作用，以逆時針旋轉的旋翼系統方向，也就是會在 9 點鐘位置產生升力，如此會使機體向右滾轉。這個效應就稱為橫向流效應。

翼尖渦流被帶離旋翼，這意味著誘導阻力會逐漸降低，使得旋翼的效率逐漸增加，因此會使升力增加，前面提到旋翼會有升力不對稱的現象，這個現象同樣會受迴轉偏移的影響，所以逆時針旋轉的旋翼，升力較大的位置在前進時會由右側轉到前方，因此使旋翼盤產生使機頭抬升的力，這就是傳導升力。隨著速度逐漸增加，當所有的翼尖渦流都被帶離開機體範圍，不再對旋翼的氣動力產生影響時，此時則稱為有效傳導升力(Effective Translational Lift, ETL)。

3. 地效懸停 (In Ground Effect, IGE) 及無地效懸停 (Out of Ground Effect, OGE)

如同定翼機，直升機也會有地面效應，也就是因為翼尖渦流被地表所擾亂，使得傳導阻力降低造成升力增加，同時也因為氣流在旋翼和地表間產生了一個高壓氣墊，而產生了更大的上揚力。直升機在懸停時，完全依賴自身發動機的性能，因此若能運用地面效應，將可以有效提升操作效率；但反過來說，若是直升機飛行員沒有注意到地面效應的存在與否，將會對於直升機操作安全有所影響。在直升機操作上，因而有這兩個名詞地效懸停以及無地效懸停。

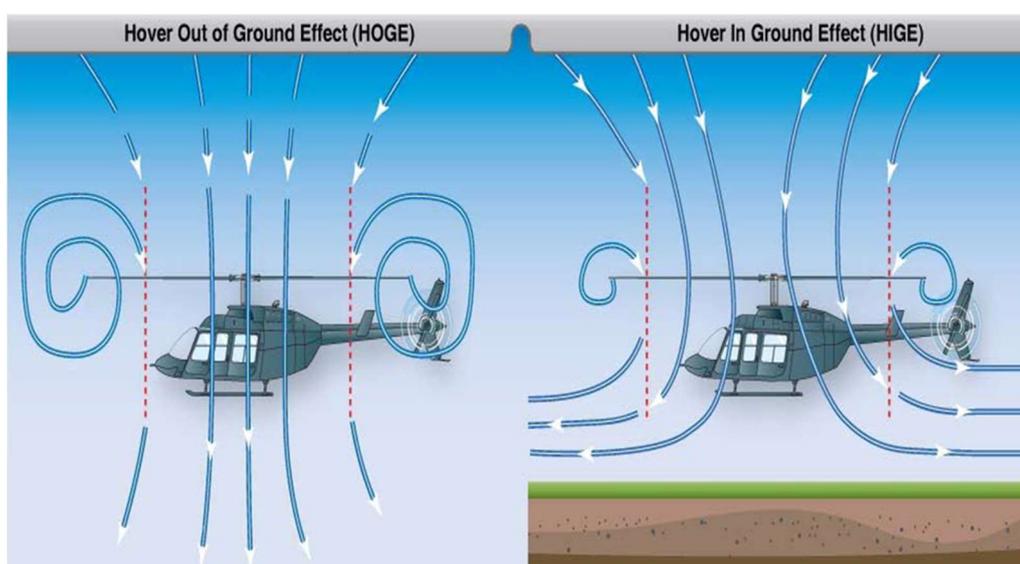


圖 3.8-10 不同地效懸停狀態示意圖

4. 自旋及高度-速度圖(Height -Velocity Diagram)

直升機若遭遇發動機失效時，所採取的緊急程序稱為自旋(Autorotation)，或可類比為定翼機在發動機失效時的滑翔。直升機之所以能夠做到自旋，是因其主旋翼配有空轉單元(Freewheeling unit)，在發動機失效時，能將主旋翼與發動機解聯，使旋翼自由旋轉。在動力飛行時，氣流經過旋翼的方向是由上而下，自旋時則是由下而上經過旋翼，藉此保持主旋翼的旋轉，維持旋翼的動量，直到接近地面時再調整旋翼片的傾角，以旋翼剩餘的動量達到減低下降率安全落地的目的。另一個會採取自旋程序的緊急狀況為尾旋翼失效，因為在自旋時，直升機並不產生扭矩，因此即使尾旋翼失效，自旋時飛行員仍得以保持直升機航向的控制。

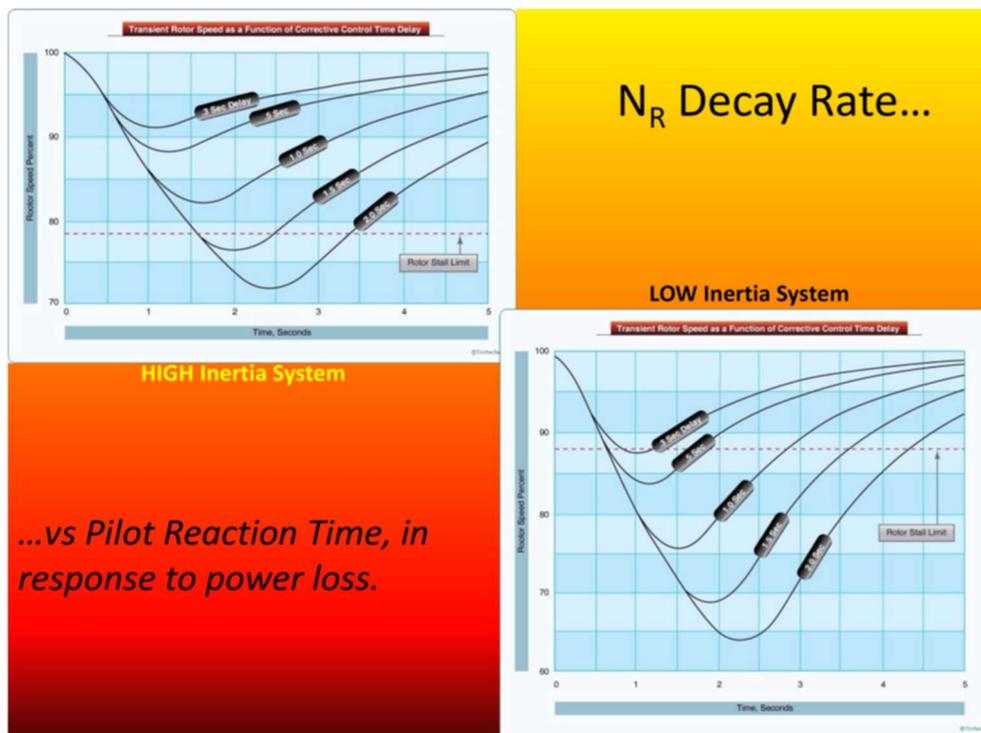


圖 3.8-11 直升機自旋時飛行員反應時間與旋翼轉速關係圖

自旋是否能夠完成，與飛行員的反應時間有很大的關係，如圖 3.8-11 所示，即是飛行員反應時間的對於主旋翼轉速變化的關係圖。此外，自旋程序開始時的速度與高度，也與自旋成功與否息息相關。因此針對每一種直升機，都會有一張高度-速度圖。如圖 3.8-12 所示，為單發動機直升機的高度-速度圖，橫軸為空速，縱軸為高度。圖上可以見到有兩塊標示避免的紅色區域，提示飛行員避免在如此的高度與

速度組合的範圍內操作，因為這樣的高度及速度，無法順利轉換為自旋並安全落地，因此高度速度圖也暱稱為死人曲線 (dead man's curve)。自旋需要相當的速度，因此若在左邊的區域，表示其速度不足，所在的高度也不夠轉換為所需的自旋速度。而在右邊則表示其高度不夠轉換為自旋，亦即飛行員的反應操作時間不足。若是多發動機的機種(如圖 3.8-13)，在遭遇單一發動機失效時，其高度速度的限制就少了許多，同時還有劃分出可以安全落地以及成功飛離的區域。

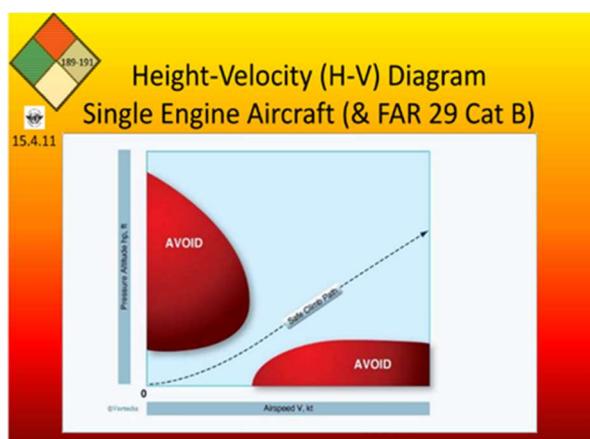


圖 3.8-12 單發動機直升機 H-V 圖

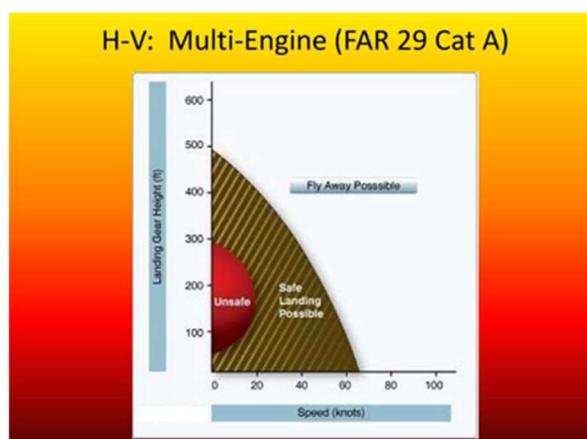


圖 3.8-13 多發動機直升機 H-V 圖

3.9 事故樣態與生還因素

在前面關於直升機事故的統計中顯示，直升機事故佔比最高的是失去控制，而這其中大多都能與飛行員未能掌握直升機空氣動力特性有所關聯。以下就擇取與直升機操作特性相關所導致之事故樣態分別敘述。

1. 性能管理

在前一章節，有提到直升機旋翼的傳導升力，因此直升機在做定點懸停時所需的發動機輸出，會大於有移動速度狀態下所需的發動機輸出（如圖 3.9.2）；再納入高度差異或是其他外在環境造成之所需的發動機輸出功率變化，直升機飛行員若未能注意到操作時直升機重量及外在環境差異變化，便有可能在操作上面臨風險。

Loss of Control: Breakdown				
LOC Type	Acronym	# of Accidents	% of LOC	% of Accidents
Performance Management	PM	30	37%	17%
Dynamic Rollover	DR	12	15%	7%
Operating Limitations Exceeded	OL	11	13%	6%
Loss of Tail Rotor Effectiveness	LTE	8	10%	5%
Emergency Procedures	EP	10	12%	6%
Ground Resonance	GR	4	5%	2%
Control Interference	INT	2	2%	1%
Tie-downs not removed	TD	1	1%	1%
Setting with Power (VRS)	SP	1	1%	1%
Unknown	UNK	4	5%	2%

圖 3.9-1 直升機失控成因

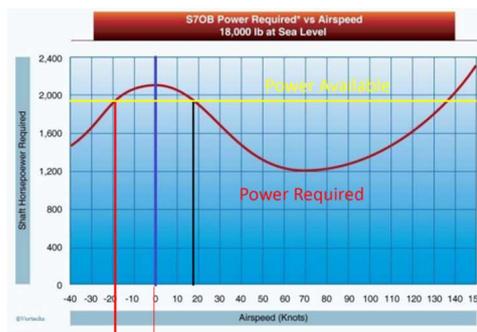


圖 3.9-2 飛行所需功率與空速之關係

2. 靜態翻滾(Static Rollover)及動態翻滾(Dynamic Rollover)

當直升機起降時，在起落架與起降場面接觸的狀態，因重心位置的變化，使直升機產生以一側接觸起降場面之起落架為軸的旋轉，而使改正此旋轉所需的操作，超過了直升機操控的能力，便會造成直升機失控翻滾，這樣的翻滾又分靜態翻滾 (Static rollover) 及動態翻滾 (Dynamic rollover)。靜態翻滾成因相對單純，也就是當直升機停止時，其重心超出起落架的範圍時，便會造成直升機翻滾，通常發生在具坡度的起降場。

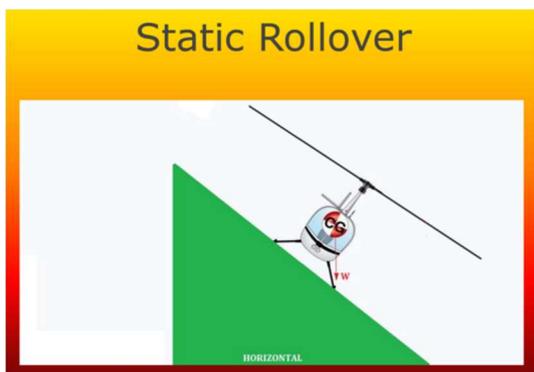


圖 3.9-3 靜態翻滾示意圖

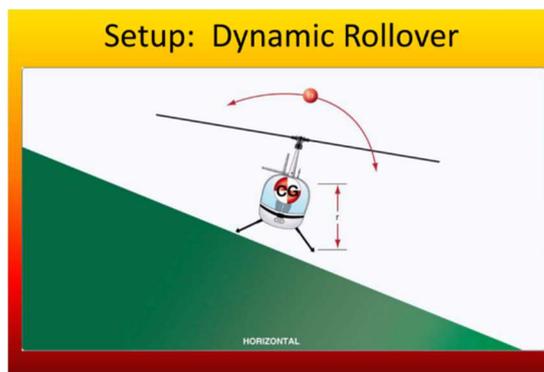


圖 3.9-4 動態翻滾示意圖

動態翻滾的成因則較為複雜，當直升機起降時因為某個因素，導致直升機以著地的起落架為軸產生旋轉，直至達到其臨界翻滾角。當直升機重心超過這個臨界角後，會因直升機主旋翼所產生的推力繼續滾動，使得飛行員無法以任何操作改正。動態翻滾除了會在坡面進行起降時發生，在相對平整的起落場，也可能因為側飛時，側飛方向側之起落架接觸地面，又或是因為外界狀況，例如以主旋翼為逆時鐘轉的

機種為例，當直升機的重心偏在右邊，而又遇上左側風的狀況時，主旋翼及尾旋翼的推力線會造成直升機向右滾轉的趨勢。若在右滾轉發生後未能及時改正，便可能會因為主旋翼及尾旋翼持續將直升機向右滾轉，而最終超過臨界角導致無法修正。過大的滾轉率以及大重量，均為動態翻滾的促發因子。起落場的表面若是鬆軟的草地或泥地，或是在其他不穩定的場合如船隻或是水面同樣也有可能發生動態翻滾。

3. 渦流環狀態 (Vortex Ring State, VRS)

當直升機在靜風狀態懸停時，大量的空氣經主旋翼由上而下流動，產生向下的氣流。但翼尖的一部分空氣會從主旋翼下方向上翻起，又重新進入迴圈，這就是我們熟知的翼尖渦流。翼尖渦流會沿著旋翼尖端形成一個甜甜圈環，這便是渦流環。渦流環消耗直升機的馬力但不產生升力。旋翼內側部分的速度比尖端慢得多，當直升機下降率增加，旋翼根部空氣向上流動的量增加，向上流動的空氣可能會改變和增加靠近旋翼內側部位的局部攻角，從而使旋翼的內側部位失速，這就是渦流環狀態。有時渦流環狀態會與帶動力沉降(*settling-with-power*)混淆，這兩者雖然都是直升機在有動力的狀態下降，不過關鍵性的差別在於：渦流環狀態有主旋翼失速的情形，而帶動力沉降則沒有主旋翼失速的情形，單純是因為下降率過大，飛行員來不及增大動力以減低下降率而導致的事務。



圖 3.9-5 渦流環狀態示意圖(credit: Wiki)

4. 尾旋翼效應喪失 (Loss of Tail Rotor Effectiveness, LTE)

如前所述，在單主旋翼直升機主旋翼旋轉產生的扭矩，是由尾旋翼提供的推力抵銷。飛行員的操作、主旋翼旋轉時產生的翼尖渦流，以及風都會對尾旋翼推力產生影響，甚至會使尾旋翼喪失效應。喪失尾旋翼效應通常發生在最後進場落地，或低高度、低空速貼近地面飛行狀態時，是由於相對風以及主旋翼，對尾旋翼所產生的影響所致，並非機械問題。同時尾旋翼並非處於失速狀態，而是效率降低。不當或較遲的修正動作會加劇偏轉，並可能會導致直昇機因而無法控制肇生事故。

導致尾旋翼效應喪失的原因主要有四點，以下取逆時針旋轉的主旋翼系統做說明：

A. 風標穩定性(Weather Cock Stability)

當風由直升機的 4 點鐘到 8 點鐘方向吹來，會使得直升機主旋翼所產生的翼尖渦流滯留在尾旋翼附近，因而使尾旋翼效能降低，同時直升機的機身會因風而產生偏轉，故會產生飛行員不預期的橫轉(yaw)。以 4 點鐘方位來風為例，直升機會向右橫轉；若來風為 8 點鐘方位，直升機則是向左橫轉。

B. 尾旋翼渦流環狀態

當風由尾旋翼的 8 點鐘到 11 點鐘方向吹來，會使尾旋翼產生渦流環狀態，也就會使尾旋翼無法產生有效推力，造成直升機向右橫轉。

C. 尾旋翼攻角減小

當風由尾旋翼的 2 點鐘到 4 點鐘方向吹來，會使尾旋翼的攻角變小，同樣會讓尾旋翼產生的推力降低，產生直升機向右橫轉的趨勢。

D. 主旋翼翼尖渦流影響

當風由直升機的 9 點鐘到 11 點鐘方向吹來，主旋翼產生的翼尖渦流會進入尾旋翼，因而使尾旋翼無法產生有效推力抵銷扭矩，造成直升機向右橫轉。

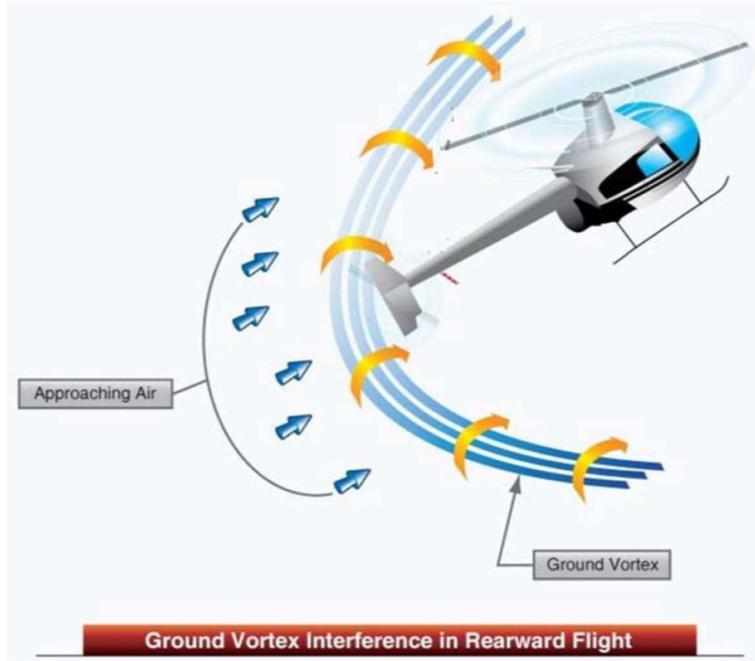


圖 3.9-6 風標效應成因

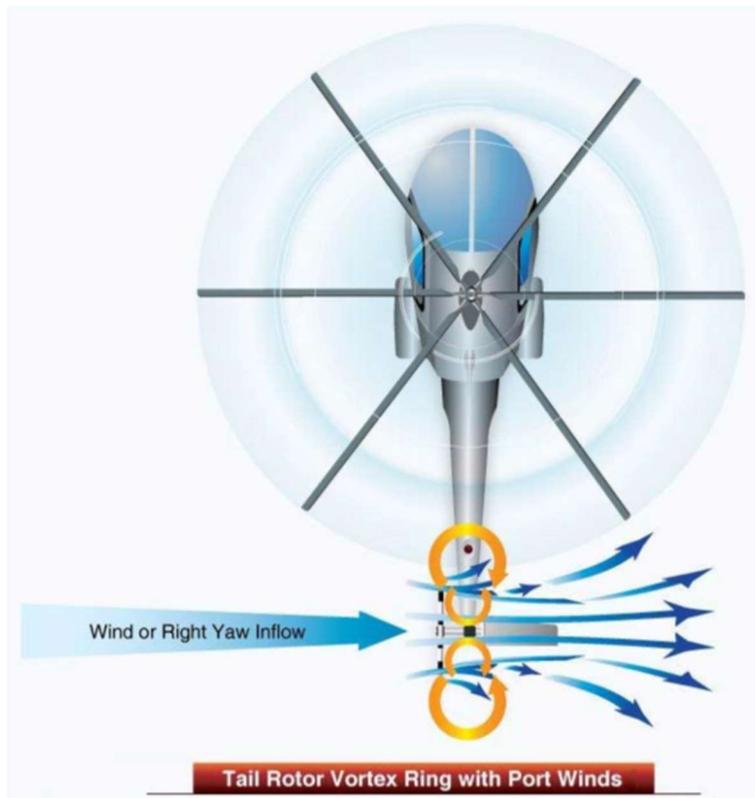


圖 3.9-7 尾旋翼渦流環狀態

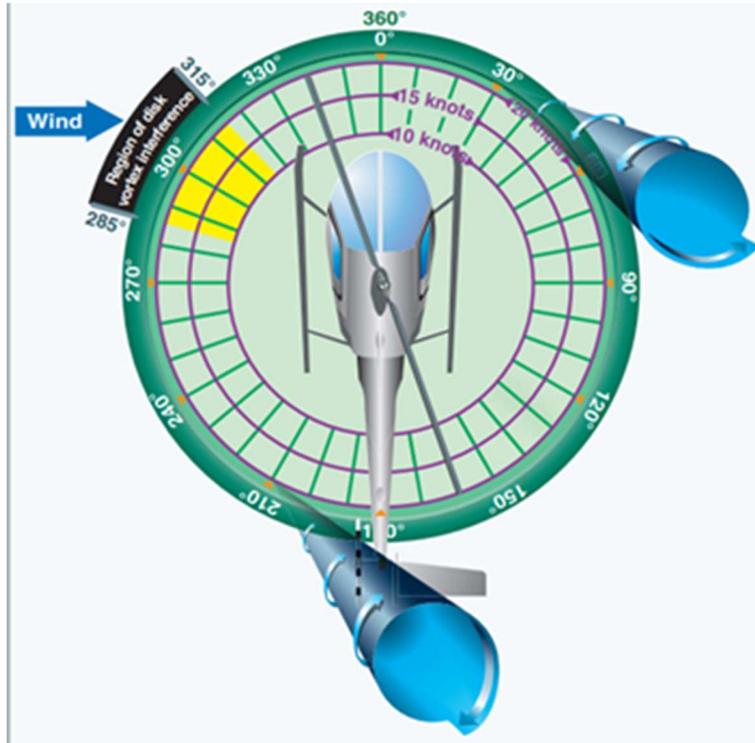


圖 3.9-8 主旋翼翼尖渦流影響(Credit: Wiki)

上述四個因子彼此之間可能會有互相引導的作用，甚至是加成的效果。舉例來說，一開始風由直升機 10 點鐘方向吹來，產生向右橫轉，此時風造成尾旋翼的渦流環狀態，始直升機繼續甚至加大向右橫轉，而使風變成由機尾吹來產生風標穩定性問題，又進一步加劇了失去尾旋翼效應。喪失尾旋翼效應是許多直昇機事故的誘發因素，若能重建直升機於事故時的動態，將對於事故分析有極大的助益。

3.10 Robinson Helicopter 工廠參訪

羅賓森直升機公司(Robinson Helicopter Company, RHC)創立於 1973 年，是一家專門生產小型民用直升機的公司。公司位於加州托倫斯機場，創辦人 Frank Robinson 即在此地造出第一架 R-22 原型機。羅賓森先生創立這間公司的目的，是希望能夠製造出設計簡單、易於維護和購置成本低的小型直升機，自創立至今已交付超過 13000 架直升機給全球各地的買家。RHC 目前生產三種型號的直升機：R-22，R-44 及 R-66。各型還有因應不同操作目的的衍生次型號。2020 年曾發生於新北市淡水區違法操作起飛的輕型直升機，即為 RHC 所生產的 R-22 型直升機。

RHC 所有的直升機產品，都是由位在洛杉磯南邊托倫斯機場的工廠所製造、組裝、檢查和進行飛行測試。除了製造新產品外，RHC 工廠也接受委託定檢大修他們所製造的直升機。參訪行程由 RHC 的歷史簡述開始，之後再由資深員工擔任導覽人員帶領參訪 RHC 的廠區，為參訪的學員解說整個直升機的製造過程與 RHC 工廠的運作。由於保安考量，除了在入口及交機中心外，整個過程並不允許攝影及錄影，但為了更清楚呈現 RHC 廠區與生產線的樣貌，以下說明將會借用網路上取得，Vertical mag 所錄製的 RHC 工廠內部影像，以期能更完整與具體的呈現參訪過程。



圖 3.10-1 RHC 廠區 (Credit: RHC)



圖 3.10-2 原材料(Credit: Verticalmag.com)

RHC 直升機製造過程的極大部分，包含零部件的生產製備，都是在這個廠區內完成。RHC 的直升機是由超過 5000 個零部件所裝配而成，而這其中接近 80%的零部件，是由 RHC 自行於此廠區內所製造。製造過程由原材料開始，RHC 購入原材料，如不同型態一條形、錠形、管形等的鋁合金材料及鋼材，也包含複合材料組件所需的碳纖維、玻璃纖維布等，再於廠區內加工成所需的零件。因此在材料加工區可以看到為數龐大整齊排列的各式 CNC 加工機，將原材料加工成為所需的金屬零部件；複合材料材質的部件如主旋翼，同樣是在廠區中自行製造。小部分委外製造或加工的組件，在入廠後也會先送至材料加工區進行精修，才會送至下一步驟。另一部分委外的工作，則包括對於零部件所作的處理，例如金屬熱處理等。而在航電系統，各式儀表與航電是依據買家需要而客製。連接各式儀表與航電的線束，其製備同樣於廠區內完成。導覽的員工特別提到了 RHC 在製造所需線材所運用的自動化生產系統，該系統的電腦內存有 RHC 所有使用線材的諸元，包含線材種類、尺寸及接頭種類。員工只需要輸入需求，該套系統即可由成網電線捲及接頭等原料，製造出該需求所需要的線材，顯示 RHC 致力於工業製程自動化的方向。

零組件完成之後，會送至 QA 部門，RHC 的 QA 政策是對所有使用的零組件，都進行檢測，通過檢測的零部件方用於新機的組裝，或是供應售後服務部門，抑或有更換零部件需要的買家。QA 部門除了以人力檢測外，對於部分關鍵零件也會以高精度的電腦檢測，例如槳轂會以三坐標測量儀(Coordinate Measuring Machine, CMM)檢測，以確保品質。主旋翼片除了檢測品質外，並會依照旋翼片重量配對，以求盡可能平衡並減少振動的發生。



圖 3.10-3 零組件半成品
(Credit: Verticalmag.com)



圖 3.10-4 零組件製造
(Credit: Verticalmag.com)



圖 3.10-5 線束製造區
(Credit: Verticalmag.com)



圖 3.10-6 零件 CMM 檢測
(Credit: Verticalmag.com)

在裝配線上的整機裝配，由滑橇開始、裝上機身、齒輪箱、發動機，至此步驟整個直升機的外部雛型便已具備。接著再裝上航電系統及座艙內裝的細部組裝。由於每一架 RHC 直升機所選配的裝備都有所不同，大至發動機、航電儀表，小至座椅包覆材質等，因此每一架 RHC 直升機的裝配組裝，都會有一份專屬的工單(work order)，詳細記載所需要的組裝零部件，以及應進行之組裝程序。完成裝配之後的直升機，接著就是送往噴漆部門，為新機噴塗上買主客訂的顏色及塗裝。完成後，會直接於 RHC 廠區所在的托倫斯機場，實際飛行執行所需的試飛檢查。



圖 3.10-7 機身裝配
(Credit: Verticalmag.com)



圖 3.10-8 機門裝配
(Credit: Verticalmag.com)

完成試飛及一切生產程序並取得出廠認證後，便能夠在交機中心交給買主。由於航太產業技術門檻較高，航空器製造商的數量相對較低，因此顧客來自全球各地的情況相當普遍，是買家全球化相對較高的產業。以 2021 年為例，RHC 交付了 244 架各類直升機，其中銷往美國以外的數量約為 70%，所以對於沒有直接交機的買家，RHC 則借助貨運將製造完工的直升機送到買家手上。RHC 會將成機拆解為機身、尾桁(Tail boom)及主旋翼三部分，分別裝箱入貨櫃送至買家，依照工作人員的說法，三個部分可以裝入一只 20 呎的標準貨櫃，再以海運送至世界各地。



圖 3.10-9 機身塗裝
(Credit: Verticalmag.com)

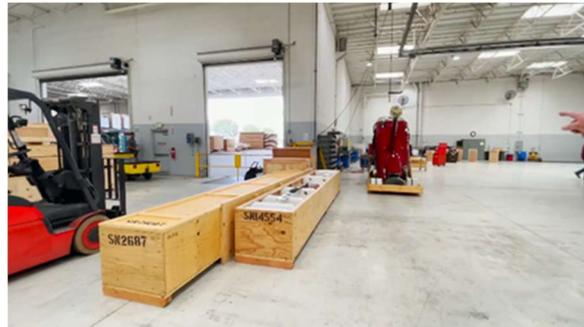


圖 3.10-10 成機運送
(Credit: Verticalmag.com)

如前所述，RHC 的廠區除了製造新機外，也接受買家的直升機大修委託。所以在工作線上，也能看到並非全新的機身，正在接受翻修；除了機身及相關部位，RHC 廠區內也有活塞發動機的試車台，擁有翻修發動機的完整能力。整個 RHC 廠區，若以航太產業的規模來看，並不是很大，不過麻雀雖小，五臟俱全。從寥寥數人的小直升機製造者，經過將近半世紀的發展，成為首屈一指，擁有 1300 名員工的輕型直升機製造商，RHC 顯然自有其獨到之處。



圖 3.10-11 RHC 交機中心

3.11 實機殘骸檢視演練

事故現場的殘骸及跡證檢視，是事故調查中極為重要的一個環節。如何能夠在事故現場，有系統地梳理殘骸，並在檢視過程中收集到所需要的跡證與資料，是一項重要課題，也是本次課程的重點之一。殘骸檢視演練進行的地點，是 USC 位於洛杉磯東北方阿罕布拉的 Aviation Safety Lab。在此實驗室中，收集了相當數量的航空器事故的殘骸，包含各式航空器定翼機、旋翼機、無人機，也可看到受到各式損害的殘骸如撞擊、火損等。殘骸檢視課程所使用的殘骸，是實際發生於 2007 年 5 月在美國德州聖埃利薩里奧一起直升機事故的殘骸。該起事故是一架隸屬美國海關和邊境保護局的單引擎歐洲直升機公司 AS350-B3 渦輪直升機，註冊號 N851BP，於美國德州聖埃利薩里奧附近執行例行邊境巡邏任務時，在高度不到 500 呎，空速 20 至 30 節，進行飛行操作時失控，之後墜落撞擊地面的一部小型貨車。造成了飛行員喪生，同乘的觀察員則是受到重傷。

課程的進行，並非是講座單純帶著學員們對著殘骸走馬看花，而是在該課程執行的兩天前，即開始要求學員閱讀相關的資料。這些資料中包含本次事故相當基本初步的一些資料，例如直升機機型，飛行開始時間，飛行時間，當時的基本天氣資料，目擊者證詞，以及依照證詞所得的失事前直升機的動態。這樣安排的目的，即在模擬當調查人員出發趕赴事故現場時所能得到的初始資料。調查人員由獲知事故發生，至整裝赴現場的過程，在時程上是相當緊湊。調查人員需就已取得的資料，構建事故的可能輪廓，並大

致規劃於現場殘骸檢視時的程序。但須注意的是，不能過於堅持於所取得的資料，因為所取得的資料是存在錯誤的可能性。



圖 3.11-1 USC Aviation Safety Lab
(紅圈處即為 N851BP 殘骸)

講座於帶領講授時首先強調，由於這些殘骸已經經過搬動不在事故發生地，同時之前由於事故調查的需要，有拆卸部分零組件如發動機送往檢測機構，因此殘骸已不完整，但仍能夠據以探究直升機於事故發生時，直升機的動態變化與對直升機機體與乘員的影響。

課程的進行，是由講座先提點殘骸檢視的部分重點，並配合數張事故現場的大型照片，盡可能還原事故當時的現場狀況。接著便是讓學員分組，共同協力檢視殘骸並討論。殘骸檢視的過程，大致是由遠而近，由大而小；先建立對於整個現場輪廓樣貌的概念，再細部檢視殘骸。先環繞現場外圈進行巨觀的記錄，記錄下現場的範圍與相關方位，再將事故航機留下的痕跡乃至殘骸，依照其在現場的位置，記錄下這些跡證與證物與參考點的相關方位與距離。

不同於定翼機，由於直升機飛行的模式複雜許多，所以在調查直升機事故時，直升機撞擊時的姿態極為重要，例如是左側還是右側較低，可以了解當時尾旋翼的作用是否正常。過程中需要注意機身或組件殘骸破損的部位、形狀及其形變的程度，主旋翼、尾旋翼、傳動及控制機構損壞的狀態等，並就所見的殘骸，推演出事故當時直升機可能的姿態，發動機動力輸出是否正常，直升機當時是可控制、抑或是失控的狀態。同時，殘骸中整體零部件的缺失與否，亦可判斷是否有空中失效的問題：在事故地點能夠找到所

有零組件，表示直升機是整架撞擊在事故地點；但若發現有缺失零組件的現象，便不能排除直升機於空中發生問題，導致部件分散分離的可能性。但調查人員該如何知道零組件有缺少？講座建議，在事故現場檢視殘骸時，需要有一位對於該機種熟悉的人陪同，修護人員是合適的選擇，若能找到維護該機的修護人員更好，因為該員對於事故機的狀況能有較多掌握。

在自行檢視討論告一段落，講座以他過去在事故現場大致的檢視步驟，帶著學員一同檢視殘骸。從殘骸在現場的樣態，接著觀察所有零部件破損的狀況，以及盡可能找出破損的成因，例如這架直升機的尾垂直翼有一個方形的破損缺口，再以殘骸相對位置查找，並對缺口及殘骸附近的水泥柱測量，大致能得到該缺口是撞擊到現場的一根方形水泥柱所導致。這樣的訊息或許看來微不足道，但卻能夠在重建直升機事故時的動態，提供必要的資訊。接著駕駛艙中各個開關的位置，以及迴旋操縱桿、集體桿、尾舵踏板的位置與狀態。這些資訊在之後需要進行更進一步分析時，都能夠提供釐清狀況所需的線索。現場檢視殘骸的過程，主要是以講座經驗分享為主，也因此學員們的提問熱烈。許多學員本身就有相當多的直升機操作或是調查經驗，所以許多問題都相當關鍵，講座也一一回應，這樣的過程讓送訓人確實受益良多。



圖 3.11-2 講座帶領殘骸檢視

3.12 真實案例研討

訓練課程的最後，講座引入一真實的直升機事故案例，讓學員們按照本梯次訓練最初的分組進行調查研討並分別提出口頭報告，而此案例中的事故航機正是前節「實機殘骸檢視演練」課程中，講座帶領學員們在實驗室實際接觸、詳細觀察的直升機，同時案例的事故基本資料、現場照片、目擊者陳述、以及航機基本資料等已在訓練的第二至四天讓學員們當作回家作業完成閱讀，因此各組對於案例已有一定程度的瞭解。正式進入分組前，講座先透過照片及錄音檔案回顧事故的現場狀況與目擊者陳述，並說明進一步提供的非現場資料，包括：實驗室報告、修護紀錄、天氣資料、操作手冊...等等。接著講座給出本課程的目標，乃是要讓學員透過分組研討的方式，分工合作、綜整相關資訊以試著找出事故的可能肇因，並提出航空器使用者、製造商、民航局或相關單位應採行的改善建議以防止此問題再次發生。

研討過程中，組內成員首先閱讀各項有關的文件資料，以確認有無天氣、機械、材料、修護的因素在其中。一一排除後，傾向認為是飛航組員操作的問題，使該直升機進入了不穩定的狀態，且由於高度不足無法有效採行改正措施以致失控墜毀。因此在改善建議的部份則是提出應加強航空器的操作訓練，避免在低高度時進入不穩定狀態以防止事故再發生。

這樣的真實案例探討，其實就是調查案的縮影，讓學員可以身歷其境地感受並體驗調查作業的流程，對於未來調查工作的執行具有非常實質的幫助。

四、建議

相較於定翼機，直升機由於可以懸停、後退、側飛等飛行特性，加上能夠不需跑道而於狹窄複雜地形中起飛，使直升機的運用用途相對廣泛且彈性，但是所伴隨的，是須在相對較高風險的情境下執行飛行操作。圖 4 為台灣飛安統計中，國籍直升機全毀及致命事故率。對比於第 3.6 節、圖 3.6-1 所示之美國旋翼機事故率及死亡事故率，雖然台灣飛安統計採用五年移動平均值，但仍能予人大致輪廓。這其中有一個令人警惕的狀況：台灣的直升機事故率為美國的數倍！



圖 4 國籍直升機全毀及致命事故率（台灣飛安統計 2012-2021 年）

台灣直升機的運用以公務航空器為大宗，常需在惡劣環境中進行飛行操作，因而面對較高的風險。運安會對於運輸事故的調查，目的係在避免事故的再發生。然而完善周延的事故調查，須構築於調查人員擁有足夠的調查專業素養。本次送訓人所參訓的 USC 直升機事故調查課程，課程內容多樣紮實，講師知識經驗豐富，確實帶給學員豐碩的收穫。除此之外，來自不同國家不同單位的學員，在課堂上對於授課主題的腦力激盪，與課餘時對於課程乃至於其他航空事故調查的心得與經驗交流，不僅在提升送訓人有關直升機事故，與其他航空事故領域的調查專業素養有所助益，調查員彼此之間的互動，對於本會與其他國家相關調查單位的非正式交流相信亦有所提升。因此建議持續辦理本會調查人員參與相關的專業訓練課程，期能更加提升本會之調查能量。