

# 飛航事故 抽絲剝繭尋真相

大部分的飛航事故都是因為人為疏失、機械故障或環境因素發生的，然而事故種類繁多，調查員須透過科學儀器與專業經驗，以抽絲剝繭的方式拼湊證據，並採取科學化、系統化與邏輯化的調查，才能找到真正的原因。

■ 官文霖、莊禮彰、郭嘉偉

## 失事原因眾說紛紜

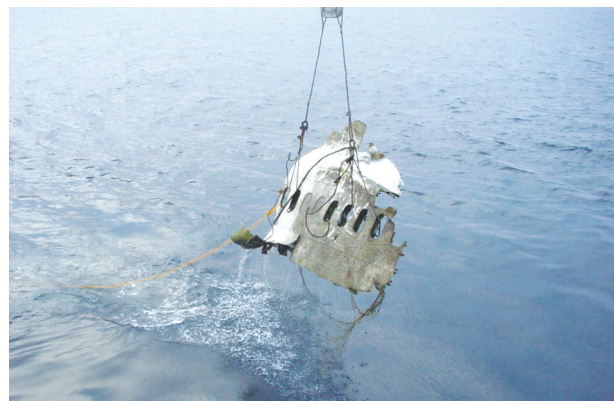
近期發生於澎湖的 ATR72 型機事故後，一定有不少讀者關心失事原因的調查工作。本文以過去的一個案例加以說明。

民國 91 年 5 月 25 日，一架國籍航空波音 747-200 型機，國籍標誌及登記號碼 B-18255，原預定由桃園中正國際機場飛往香港赤鱗角國際機場，卻在台北時間 15:29 墜毀在澎湖縣馬公市東北方約 23 海里處海面。雷達資料顯示，該機在 34,900 英尺高度時發生空中解體。機上所載的 225 人，包括 19 名機組員及 206 名乘客全數罹難。

【5/25 ETtoday】……華航班機很可能是在空中發生強烈氣爆而快速解體，使機長來不及呼救。至於發生的原因可能是炸彈爆炸等因素，甚至不排除是流星撞擊導致飛機解體……

【5/25 中時】昨日華航班機在澎湖馬公西北附近海域發生空難事件。事件發生時，在馬公以西海域正好有國軍單位公告實施火炮射擊，華航班機失事是否與此有關，相關單位正在深入調查中……

【5/26 聯合報】目前因為尚未尋獲黑盒子或飛機本體的殘骸，一切原因都屬臆測。但總括而論，仍不外是機械故障、機體內部爆炸、外力撞擊及機體裂縫所導致……



事故發生後，政府立即在馬公機場設立空難中央緊急應變中心展開搜救作業，搜尋罹難者遺體及飛航紀錄器水下定位發報器訊號。

【5/26 ETtoday】馬公空難 / 華航遭中國導彈擊落？北京否認……

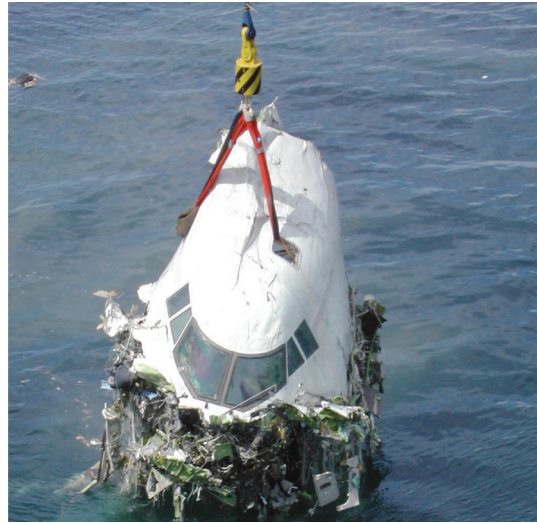
## 抽絲剝繭找出原因

這起發生在澎湖外海上空的空中解體事故，造成機上 225 人全數罹難，飛機全毀，是台灣有史以來死亡人數最多的空難事件。事故發生後，政府動員前所未有的大量人力與資源投入海上救難行動。專責飛航事故調查的飛航安全調查委員會（飛安會）也立即組成專案調查小組（調查小組），集合同內外數十名專業人員，歷經長達 5 個月的大規模殘骸打撈，以及長時間的資料蒐集與分析，終於在民國 94 年 2 月 25 日發布這起飛航事故的調查報告。

報告指出，這起事故可能是由於機身後段底部蒙皮上既存的 71 英寸裂紋，引發機身結構失效，最後導致空中解體。然而如此複雜的空難事件，在飛航紀錄器（黑盒子）無法提供足夠的線索下，飛安會如何從一千五百餘件的殘骸中，找出這關鍵性的證據？既存的 71 英寸裂紋，又為何能引發波音 747-200 型機龐大機身的結構失效？事實上在這些調查結果的背後，有一系列縝密且嚴謹的分析。

## 關鍵證據 — 殘骸

**殘骸外觀檢查** 當尋獲殘骸時，不論是在海面或海底，都須依打撈順序編號，如 640C 號就表示第 640 號水下疑似目標，經打撈上岸後研判需要進一步測試、運送或儲存的目的而被切割下來，再加上英文字母「C」標記。除了編號外，調查小組



駕駛艙下方呈現嚴重的撞擊現象

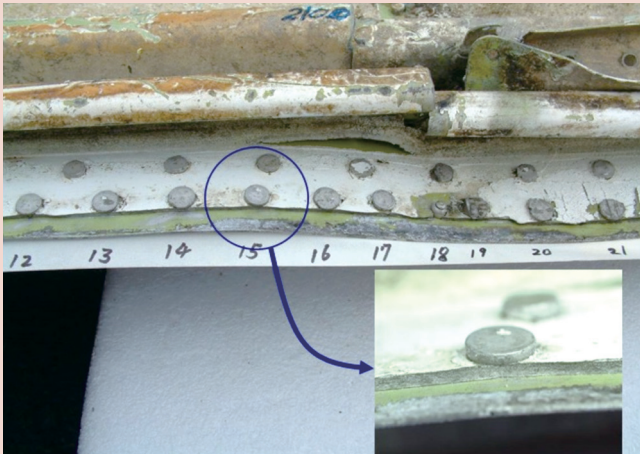


左翼殘骸

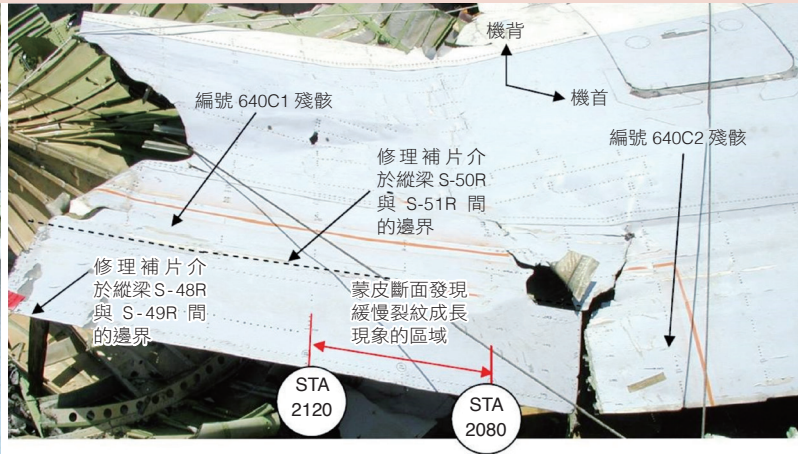


共 1,448 件殘骸被打撈上岸。

在飛航事故調查結果的背後，有一系列縝密且嚴謹的分析。



編號640殘骸的平坦斷面(右下方是巨觀檢查情形)。

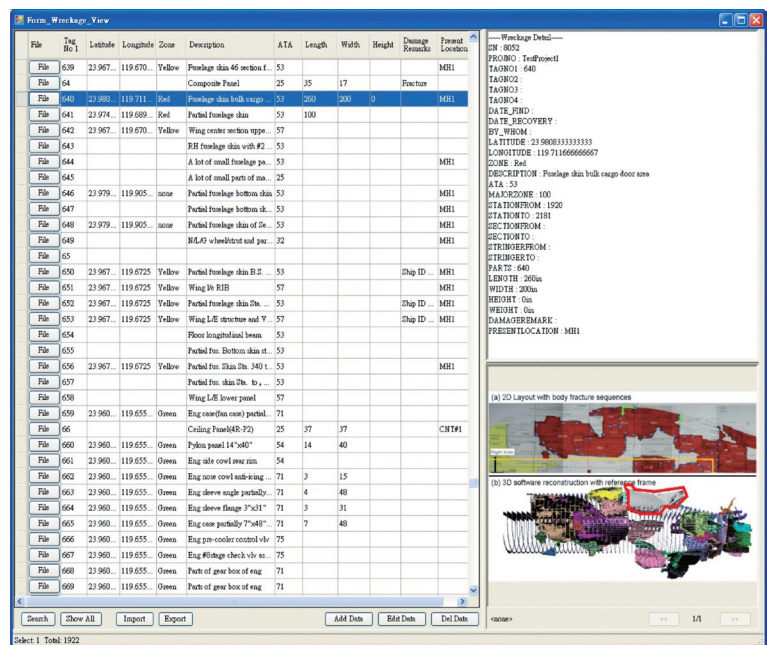


編號 640 殘骸

也會檢視殘骸外觀並做成紀錄，包括打撈位置、尺寸、破壞特徵等。這事故總計有 1,448 件殘骸登入編號，並儲存在飛安會的事故殘骸資料庫中。

調查小組檢查殘骸外觀後，發現飛機前半段外形較完整，入水時姿態也較穩定，機翼應在入水時受撞擊後才脫離機身，4 具發動機應在空中時就與機身分離。在水平尾翼和垂直尾翼上分別找到屬於第 46 段機身（機身後段）殘骸撞擊過的痕跡，與嵌入其上的碎片殘骸，研判 CI611 班機在空中開始解體之初，尾部結構並未馬上與機身脫離，由此更加確認殘骸自第 46 段機身開始斷裂的結論。

**材料檢驗** 在實驗室裡常見的材料檢驗項目包括：外觀目視檢查及照相；實體顯微鏡觀察，常用於巨觀觀察與分析；非破壞性檢測（如超音波、渦電流、磁滲、X-ray 等），在不破壞材料的情形下，觀察材料內部的微小裂紋或其他缺陷；材料機械性質和材料特性測試（如拉伸試驗、硬度試驗等）；化學光譜分析，分析材料的各項化學元素成分；掃描式電子顯微鏡檢查，常用於材料的微觀觀察與斷裂模式分析。



殘骸資料庫包含所有殘骸標籤上的資料，對每一殘骸資訊做多項分類，以利調查時的分類查詢並與資料庫整合。

在調查中，小組成員分別在中山科學研究院、波音飛機公司材料科技與設備品質保證部門等，進行了相關的材料檢驗與觀察，例如以 X-ray 掃描觀察艙壓釋放閥門的內部機構，判斷閥門內部的變形情形；



調查小組在桃園棚場內把 34 片飛機殘骸固定在結構模型框架上，完成三維殘骸硬體重建。



三維殘骸硬體重建（機身左側）。

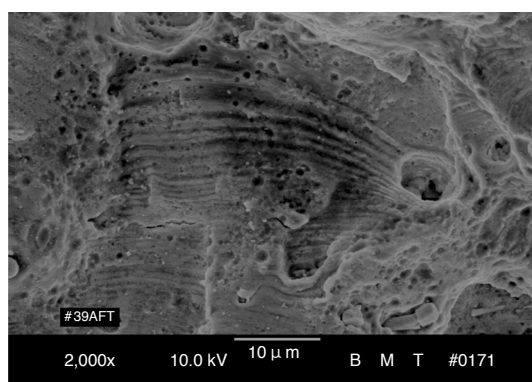
以傅利葉轉換紅外線光譜儀檢驗蒙皮上不明沉澱物的成分，確認沉澱物成分與機身塗漆是否相同；以非破壞性檢測方法檢驗殘骸上是否有微小裂紋與缺陷等；而最重要的，是以掃描式電子顯微鏡觀察殘骸斷裂面，以判斷殘骸的斷裂模式。

在仔細觀察編號 640 殘骸的斷裂面後，調查小組發現了多處疲勞裂紋。

調查小組發現：事故航機曾於民國 69 年，在香港啟德機場落地時發生機尾觸地事件，致該機後機身機腹結構受損且蒙皮存有刮痕。依據資料，該機並未在啟德機場修理，而是以未加壓方式飛渡返台，之後在台灣完成機身蒙皮的修理。

令人扼腕的是，後續的修理程序並不符合原製造公司波音的要求。波音修理手冊有規範刮痕的修理標準：若未超過限度可僅作蒙皮打磨修理；但若超過限度，須把受損傷的蒙皮移除，再加上一塊金屬修補片，或更換整片蒙皮。

調查小組發現，編號 640 殘骸有一塊金屬修補片，底下的蒙皮上還留著當年機尾觸地的刮痕，而且刮痕已經超過容許限度，推測這些刮痕會造成蒙皮上產生應力集中的現象。此外，這片金屬蒙皮位在加



斷裂面上的疲勞紋（SEM 微觀觀察）。

壓區，歷經多年飛機起降的加壓減壓循環後，更逐漸產生金屬疲勞裂紋。

## 關鍵證據一 殘骸重建

打撈的飛機殘骸共達 1,448 件，若全部平放在地上，就僅是一堆殘骸而已，若能重組起來，應可提供事故發生的「重要線索」。殘骸重建完成後，調查員能夠以立體的角度觀察各殘骸實際大小、外形及相互間的位置，甚至分析事故航機解體時應力傳遞的情形。除了殘骸硬體重建，飛安會也使用了三維雷射掃描器把殘骸數位化以永久保存。

## 關鍵證據 — 座艙語音紀錄器

在事故調查的初期，調查人員的工作除了打撈機體殘骸之外，首要之務就是搜尋黑盒子。在本刊 103 年 3 月 495 期的另外一篇文章中，讀者可以知道民航機上裝載著兩具黑盒子：一具是飛航資料紀錄器（FDR），記錄了航機上各系統的許多工程數據；另外一個黑盒子是座艙語音紀錄器（CVR），記錄駕駛艙內飛行員彼此的對話與塔台的通聯，以及駕駛艙內飛航儀器發出的聲響等。

在歷經 25 天把兩具黑盒子自海中打撈出來後，FDR 解讀結果對於調查團隊來說「一則以喜，一則以憂」。喜的是從資料看來，飛機在空中解體前各項系統以及飛航運作似乎都是正常的；憂的是，如果解體前一切正常，究竟是甚麼原因讓飛機毫無預警地就在空中突然解體呢？

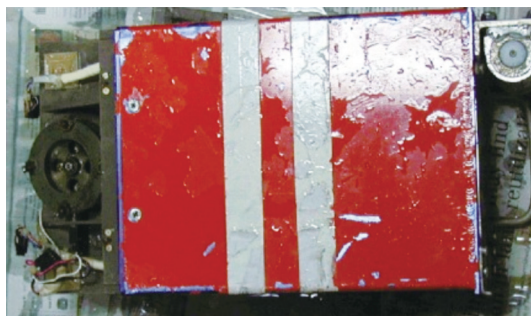
隨著時間一天天過去，如同前文所述，調查團隊逐漸釐清，這架飛機可能是因為 22 年前一次機尾觸地意外後並未按規範修理，造成日後該受傷部位因飛機不斷地加壓減壓而產生金屬疲勞，使機身蒙皮出現裂紋，導致結構失效而使飛機空中解體。

就在這項發現被指為可能是事故肇因時，CVR 記錄的語音資料給了調查小組更加肯定的證據。CVR 內錄有四軌的音訊，除了其中三軌分別是由正、副駕駛及觀察員的頭戴式耳麥收音而成的音訊，內含駕駛員之間的通話以及與航管之間的對話之外，另外一軌收錄了來自「駕駛艙區域麥克風」（簡稱 CAM, Cockpit Area Microphone）收得的聲音。

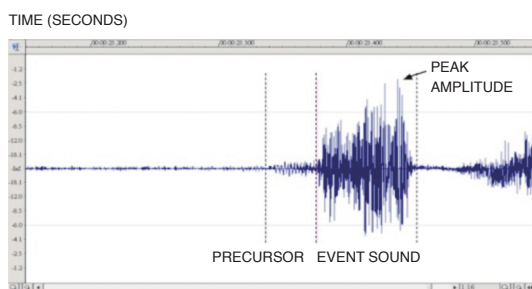
這一音軌的聲音與其他三軌不同之處在於，因為麥克風本身就安裝在駕駛艙前側上方的面板處，使得除了可以錄下駕駛員之間的對話外，因駕駛員操作儀器而產



打撈上岸的受損座艙語音紀錄器



打撈上岸的受損飛航資料紀錄器



事故班機 CVR 紀錄器終止前座艙區域麥克風音訊

生的聲響或外界的聲音（如發動機或雷擊等）也會一併收錄。對於調查人員來說，這個音軌有時會提供不少幫助。以這個調查案來說，CAM 最後錄到機體斷裂的聲響，提供了調查小組對於機身出現斷裂的位置的判斷，進而確認斷裂區位與 22 年前機尾觸地事件的位置相同。

聲音在不同介質中的傳遞速度不同，簡單來說，在密度大的介質中傳遞速度較快。聲響的強度也會隨傳遞距離增加而衰減，這項特性在密度大的介質中更加明顯。以空氣與飛機蒙皮金屬這兩種介質來說，金屬密度較空氣大，藉由空氣傳遞的聲音雖然速度較慢，但強度衰減並不如由金屬傳遞的聲音那樣明顯。反之，由金屬傳遞的聲音雖然傳遞速度較快，但音訊強度會較由空氣傳遞時微弱。

因此，在 CI611 調查案中為了判定發生機體斷裂的確切位置，調查人員便利用上述聲音的兩項特點來加以確認。聲音在機體上傳遞有兩種路徑：

路徑（一）聲音完全由機體金屬傳遞而抵達駕駛艙的 CAM，雖然抵達時間最早，但因為是完全由金屬傳遞，所以訊號強度最弱。由於它比由空氣傳遞的事件聲音較早抵達，因此稱為「前兆」。

路徑（二）又分為聲源在加壓區及非加壓區兩種。如聲源位在加壓區，聲音就可直接經由空氣傳遞至駕駛艙後由麥克風收音；如聲源位在非加壓區，聲音需要先穿過隔離加壓區及非加壓區的機體金屬結構後，才能由空氣再次傳遞至駕駛艙。

在使用路徑（二）的音訊強度上，由於非加壓區的聲音需要先通過金屬介質，在抵達 CAM 時訊號已經大幅減弱，振幅與前兆聲音相差不遠；而加壓區的聲音完全藉由空氣傳播，由 CAM 收錄的聲響振幅應明顯較前兆大。

由於事件本身聲響明顯較前兆大，因此調查人員推斷機身斷裂區在加壓區，也符合前述由加壓區蒙皮結構失效而發生事故的推論。此外，藉由前兆與事件本身聲音的時間差，配合空氣與機身蒙皮的密度資料，調查人員更可以精準推斷聲源的位置，與當年發生機尾觸地事件位置做進一步比對。

## 一個小失誤導致的悲劇

因 22 年前機尾觸地事件未按標準程序修理，使這片位在加壓區的受傷金屬蒙皮在歷經多年的加壓、減壓循環後逐漸產生金屬疲勞裂紋，這些裂紋以穿透蒙皮的方向成長。

直至民國 91 年 5 月 25 日這個不幸的日子，當航機爬升接近巡航高度 35,000 英尺時，漸增的壓差造成機身下方蒙皮的既存裂紋超過其臨界長度，使蒙皮結構殘餘強度低於航空器的操作應力，機體結構因而裂解，引發艙壓迅速洩放。機身下方蒙皮快速往機身上半部撕裂，在座艙語音紀錄器與飛航資料紀錄器記錄到重要的異常資料前，電源線已遭切斷。

殘骸開始自機身兩側脫離，由垂直尾翼上發現陷入的殘骸碎片得知，機腹右側殘骸碎片脫離機身後，撞擊至垂直尾翼前緣及其右側，在不完整的機體結構漸無法支撐尾部重量的情形下，機尾開始斷裂並與機身分離。在機身解體的過程中，航機可能因姿態劇烈變化而產生巨大慣性力矩，而使四具發動機在空中就與機身脫離。由發動機殘骸尋獲位置相當集中的情形研判，4 具發動機幾乎同時脫離機身。

澎湖空難自事故發生日起，調查團隊歷時近 3 年才完成調查作業並發布最終調查報告，期間投入了史無前例的人力物力與資源。本文礙於篇幅，僅就殘骸檢視、材料分析與飛航紀錄器 3 個關鍵面向，帶領讀者一窺調查人員如何自細微的證據中運用科學方法找出飛機失事的背後原因。

由於這調查作業牽涉範圍甚廣，讀者如對進一步的調查細節有興趣，可至飛安會網站下載完整調查報告做延伸閱讀。

---

官文霖、莊禮彰、郭嘉偉  
飛航安全調查委員會

---