



後勤管理

飛機結構件銹蝕防治作業探討—以A型機為例

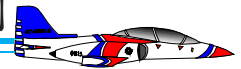
朱興輝

提 要

- 一、飛機定期維護主要目的是要能夠延長使用壽限，而銹蝕防治作業是各型飛機持續努力的重點，且台灣地處太平洋濱、四面環海，屬海島型氣候，防銹工作之執行格外地艱辛。
- 二、AT-3型機主要任務為訓練飛行員使用機種，使用迄今已逾20年，而維護單位執行銹蝕檢查等維護工作，對於易銹蝕區域加強檢查時，對所發現的銹蝕類缺失，採魚骨圖分析以進行銹蝕肇因探討，以結構件銹蝕為目標，將肇因區分自然環境、人為環境、材料因素、組裝維修過程、非金屬退化、動物及微生物及行政因素等七個方向，期能找出銹蝕防治策略，確保飛機結構件的可靠。
- 三、本文利用現有後勤資訊管理系統，蒐集96至97年563架次之銹蝕情況紀錄，採用魚骨圖分析銹蝕原因得到天候因素、檢查手法、材料因素及統計分析等四項結論，可作為銹蝕防治作業持續探討之參考。

壹、前言

飛機定期維護主要目的是延長使用壽限，然各型飛機對於銹蝕防治作業，是持續努力的工作重點，台灣地處太平洋濱、四面環海，屬典型的海島型氣候亦屬嚴重或容易腐蝕地區，執行防腐防銹工作變的格外艱辛困難。例如：民國96年9月份華



航一架波音737-800型，編號CI7552班機，由桃園飛往日本佐賀機場，過程一切正常，但在落地後檢查，發現機腹蒙皮有一道長77公分的裂痕，調查發現使用清潔劑後廢水肇致結構嚴重銹蝕，最後因蒙皮厚度不足，無法負荷壓力產生裂痕^{〔註1〕}；另美國威廉斯基地一架F-5F型雙座噴射戰鬥機，於1987年執行訓練時，發生空中解體事件，經全面清查發現部份飛機於上縱樑有嚴重的應力腐蝕的情況，使該型機採用飛行操作限制及更換上下縱樑等措施，以確保飛行安全；還有2002年因考量AT-3型機必須延長使用壽限，針對主要結構件及部份易銹蝕結構執行更換，使該型機可繼續使用15年。AT-3型機（本文後續以A型機代表）採縱列高低雙座、雙發動機、懸臂無後掠低單翼、全動式水平尾翼、單垂直尾翼設計，進氣口位於機身兩側，與發動機同置於機身兩側突出的發動機艙內。自70年起共生產了60餘架A型機，當初設計主要任務為訓練飛行員從初級的飛行訓練轉換到成熟的飛行員的過渡訓練轉換使用機種，作戰時可提供密接支援、反登陸等任務，所以A型機的設計特色具有良好操控性、安全性高、低耗油、低噪音、訓練效益等特色^{〔註2〕}。80年代後期考量採購新機成本及國際情勢，決定於91年起執行延壽計畫，繼續使用至民國106年。就機隊來說，使用迄今已逾20年，飛機維護單位執行每天、每月及每60天銹蝕檢查^{〔註3〕}等維護工作，是否可以滿足飛機維護需求，另場站專業單位在定期檢查（週檢）時，對於易銹蝕區域加強檢查時，所發現的銹蝕類缺失，能夠檢討肇因並擬訂未來銹蝕防治策略，以確保飛機服役期間結構之可靠。

貳、飛機維修作業簡介

一、飛機修護作業模式：

（一）例行性飛機修護：一架飛機有多少年限可使用、可以飛多遠，多少年之後會無法使用到要淘汰的地步，之所以每一架飛機他都有一定的壽命，但是為了改善這限制，使飛機發揮最大使用效益，所以飛機製造公司會利用一些檢查或是更新器材的方法，來延長飛機使用的時間與效益，而例行性的檢查或維護工作就這樣產生了。例行性維護工作是延長使用年限的重要方法，他必須要考慮很多因素，首先考量是安全，其次才會是成本，而機隊是否容易保養維護與機齡老舊、設計理念先進與否，有著直接的關係，所以新型將這些因素考量產出的

註1 行政院飛航安全委員會，華航波音737-800編號CI7552班機飛航事故事實資料報告，民97年，行政院飛航安全委員會

註2 漢翔公司全球資訊網，產品及服務軍用飛機，AT-3自強號高級教練機（1975-1989），網路資料，98年3月<http://www.aidc.com.tw/web/m5show.asp?NumberID=m503>。

註3 空軍司令部，飛機定期檢查及修護要項，民73，空軍司令部



飛機勢必容易維修保養，也更容易保持裝備的可靠度^{【註4】}，A型機使用迄今約20餘年，因擔負飛行員訓練任務，在每日使用時數過高、飛行頻率過於集中的使用環境，所以例行性維護保養工作就顯得更重要，依使用情況按時執行定期檢查，以確保飛機結構及系統的可靠。

- (二) 改正性飛機修護：對於飛機來說例行性維護保養工作是來延長飛機使用的時機與效益，那改正性維修工作則是確保飛機的妥善及增加安全的工作，也就是說飛機操作的環境變化及對於器材的考驗是嚴苛的，如當飛機從地面起飛氣溫約有攝氏33度，短短幾分鐘到了高空溫度可能降低到結冰的溫度，那更別說飛行過程中高速度產生的力矩及高頻震動等考驗，使飛機有些零附件或器材無法預期的故障，並非例行性維修工作可以掌握並改正，而改正性飛機維修工作就是在發現各系統徵兆時，即解決這無法預期的情況。A型機平日執行訓練任務區域，北有工業區、西有火力發電廠並鄰近海岸、南邊鄰近煉油廠，東邊則有多項重要交通建設，加上岡山地區具有陽光強、氣溫高、濕度高等熱帶性氣候特性，對於飛機系統的妥善及結構的防銹為飛機修維護工作的嚴峻考驗，而改正性飛機維修工作，則是將系統的故障及部分銹蝕，儘速完成改正恢復飛機妥善，繼續執行任務。

二、現行飛機修護階層區分：

- (一) 使用單位 (Organizational Level Maintenance) 保養維護：係指飛行線維護單位對其所配賦裝備保養工作，著重於平日保養維護及歷日、歷時的預防性檢查，此階段保養維護工作即所謂一、二級保養。
- (二) 場站階段 (Intermediate Level Maintenance) 修護：半固定或修護棚廠等工作場所，對於A型機俱備多種專長人員，可以執行各系統裝備的更換及修理的能力，以保持可執行任務的飛機數量，作業性質著重改正性修護即所謂三、四級保養。
- (三) 工廠階段 (Depot Level Maintenance) 修護：以固定駐地、永久性工廠組織，擔任其裝備、系統附件最高階層的修護工作，執行修護工作較深入，大部份需要非常大量的人力工時及較長的修復期程，此類工作即由專案工廠執行，其作業性質著重於修復性修護，即所謂五級保養。

三、銹蝕防治作法：台灣屬海島型氣候並具有熱帶性氣候特性，岡山地區歸類為「中度嚴重性銹蝕地區」^{【註5】}，各修維護單位依據修護政策及參考環境因素，律



註4 徐春龍，「提升裝備妥善之作為」，民97，空軍學術雙月刊

註5 空軍司令部，飛機清洗擦拭銹蝕處理及防護油漆，民79，空軍司令部



訂各項銹蝕防治執行作為，並要求相關單位落實配合執行，以確保飛機結構的可靠，俾延長裝備使用壽限，然各單位具體作法舉例如后：

(一)使用階層：飛行前中後檢查、定期全機或局部擦拭、每30天飛機清洗、60天定期銹蝕檢查。

(二)場站階段：週期檢查(300、600、900及1200小時)及加強檢查項目。

(三)工廠階段：針對主要飛安結構件執行檢查與修理工時需求長、維護階層高的工作，如C/T銹蝕處理、IRAN、ACIP及PDM等工作項目。

四、銹蝕處理：鋁合金的特性係質輕、強度高及耐腐蝕的特性，所以廣泛的運用在飛機結構上，然金屬在經過一段時間後，都有趨向銹蝕的趨勢，所以在鋁合金材料上發現銹蝕，就必須立刻將其除去，而除銹程序必須小心謹慎，避免造成未受損部位的損害，故除銹程序概述如后：

(一)清洗：產生銹蝕區域清洗、除油漬，避免造成處理區域的汙染。

(二)除銹：以適當的工具(如：300號鋁合金砂布)，小心將銹除去。

(三)清潔：除銹完成後，確實將金屬粒子及磨料清理乾淨，避免造成殘留產生銹蝕銹蝕誘發因子。

(四)轉化：使用表面鋁化劑(ALODINE)，使該區域生成鋁合金薄膜產生防護效果，切記在完成薄膜生成後以清水洗淨，避免產生殘留加速銹蝕產生。

(五)漆飾：噴塗底漆、面漆，然底漆、面漆可以有效防銹，所以為有效延長銹蝕防治效能。

(六)復原：完成除銹、漆飾後，裝具復原。。

參、銹蝕肇因探討

「銹蝕(腐蝕)係一金屬因與周圍環境所引起之化學反應產生的電化腐壞。」^{【註6】}

⁶¹因為金屬有恢復至其自然狀態之趨勢，如果兩個活性不一樣的金屬接觸，因為活性大的氧化快，活性小的氧化慢以及氧化還原時吃電子跟失去電子能力的差異，所以活性大的金屬會先把活性小的金屬氧化的份先吃掉，就是說活性大的除了自己在氧化外也先幫活性小的氧化，通常為氧化或硫化礦石的狀態，然所有結構金屬在自然環境中都會有某些程度銹蝕，當一金屬銹蝕時，金屬原子喪失電子而在電解質中形成帶正電荷之金屬電離子，並與帶負電荷之電離子相結合而形成銹蝕物，如氧化物、氫氧化物及硫化物等，然銹蝕在產生之前必須具備四種條件^{【註7】}：



註6 鮮棋振，金屬腐蝕及控制，民84，徐氏基金會出版社。



- a. 金屬存在一段時間後，會自然產生銹蝕的趨向。
- b. 對不同導電材料(陰極)其銹蝕電位，須呈現低於陽極。
- c. 電解質必須連接陽極與陰極，形成正負極間負載電流。
- d. 陽極與陰極間須有電子流動產生。

A型機平日訓練飛行員為主要任務，操作特性為使用時數過高、飛行頻率過於集中及起飛落地次數過多等使用情況，並且基地鄰近海岸，每次起飛落地過程必須穿越海面的低空區域，造成鹽份附著，另週邊工業建設易造成硫化物的殘留，每日飛行的鹽份及硫化物的殘留，加上濕度高、日夜溫差大等，使水氣與鹽份、硫化物結合形成強烈電解質，造成機件腐蝕的肇因。

肆、銹蝕防治具體作法

- 一、銹蝕防治策略：飛機銹蝕檢查為維護飛機品質，確保飛機結構件可靠，俾利延長機件壽命，各單位應依據修護策略及環境因素，擬訂並監督執行飛機銹蝕檢查及預防計畫，修管科依飛機機務狀況排定飛機日常清潔擦拭、清洗及敷塗防銹劑等工作，規劃由飛行線維護人員負責執行，並由單位品檢人員執行檢查是否確實。銹蝕檢查工作應由飛行線維護人員執行，並將情況記錄於『檢查缺點紀錄表』，並記入修護管理系統。並派遣檢驗官對銹蝕處理情況，執行複驗及查核銹蝕處理人員之技術水準，以確保從事銹蝕控制與預防工作人員均有良好水準。當飛機進入週檢工作時，應置重點於銹蝕檢查及防腐防銹處理工作。對於檢查工作卡中所列之銹蝕檢查項目必須確實執行。檢查要項與週期除確依週期檢查工作項目所規定者執行外，品管單位應將缺點情況統計分析，檢討目前銹蝕防治策略是否適宜，及飛行線維護單位維護工作是否落實，適時修訂檢查要項增（修）訂意見，以確保飛機銹蝕檢查週期適用於當地氣候及飛機使用情況，增進銹蝕控制與預防功能。
- 二、銹蝕防治作法：依據修護政策規定及環境因素擬訂A型機銹蝕檢查與預防實施計畫，律訂銹蝕防治相關作法，並成立銹蝕防治相關編組，要求所屬落實執行每日飛機檢查、定期執行飛機擦拭及清潔、每60天配合飛機清洗後執行檢查與不定期技令規範需求時機執行(如大雨後加強檢查)，另針對場站、待件及週檢機停機過久飛機，依據飛機之除銹及防腐手冊執行檢查，以減少飛機表面殘留鹽份、粉塵、及硫化物等附著產生銹蝕。

註7 US NSC, 「CLEANING AND CORROSION PREVENTION AND CONTROL, AEROSPACE AND NON-AEROSPACE EQUIPMENT」, 2003, Published by direction of commander. Naval Air Systems Command, USA



三、銹蝕檢查：依據修管科排訂每30天飛機清洗、潤滑及每60天執行銹蝕檢查等工作，成立專責編組律訂由資深飛行線維護人員執行檢查，並利用現有後勤資訊管理系統（LIMS）將A型機96年至97年所發現的銹蝕缺點計有4462項，依各系統分為22類。

伍、銹蝕檢查統計情況

依據單位年度修護計畫，定期於每30天執行飛機清洗及每60天執行銹蝕檢查，將所發現銹蝕情況記錄，並利用現有後勤資訊管理系統蒐集96至97年計檢查563架次飛機，發現的銹蝕缺點計有4462項（如表1），經查大部份銹蝕缺點為裸露艙區結構輕微銹蝕、蒙皮螺絲、螺桿及螺帽等一般五金零件的輕微銹蝕，無中度及嚴重銹蝕現象，並依該型機各系統部位區分22類系統，缺點分佈情況：

一、以飛機數量統計：依每架飛機務妥善情況執行銹蝕檢查，96-97年執行銹蝕檢查計有563架次，縱軸顯示每架機檢查次數約

7-14次，平均每架機執行銹蝕檢查11.26次，橫軸則顯示為飛機機號（如圖1），且銹蝕缺點均為一般輕微缺點，顯示統計期間每架飛機均能夠定期執行銹蝕檢查，對於飛機各項結構及艙區的銹蝕防治及控制，有正面的幫助。

二、依飛機檢查缺點請況

：96-97年執行銹蝕

檢查機數計有563架次，發現缺點數總數為4462次，大部份銹蝕缺點為裸露艙

表1 銹蝕檢查缺點統計表

代號	系統名稱	缺點數
13	起落架	1991
11	飛機構架	864
12	座艙及機身	360
23	渦輪風扇噴射發動機	285
14	飛行操縱系	280
42	電源供應系	172
41	環控系	54
47	氧氣系	45
46	燃油系	42
51	儀表系	41
44	照明系	33
45	液壓系	16
63	空用通信系	6
91	緊急裝備	6
74	軍械系	4
77	光學瞄準系	2
64	機內通話系	1
65	敵我識別系	1
71	戰術導航系	1
49	公用雜項	0
75	武器投射系	0
99	其他	258
	合計	4462



圖1 銹蝕檢查執行次數統計



區結構輕微銹蝕、蒙皮螺絲、螺桿及螺帽等一般五金零件的輕微銹蝕，惟統計期間，縱軸顯示每架機發現銹蝕缺點數量，平均為89.24項缺點，（如附圖2）橫軸則顯示為飛機機號，顯示銹蝕檢查缺點數量雖然達四千餘項，但是發現缺點均為一般或輕微的缺點，顯見平日執行銹蝕防治作為可以控制銹蝕情況。

三、依每月檢查情況：

96-97年執行銹蝕檢查發現缺點數計有4462次，總軸顯示發現銹蝕缺點數量，平均每架次為89.24項缺點，橫軸顯示檢查月份，然根據每月缺

銹蝕缺點統計表



圖2 銹蝕檢查缺點數統計



圖3 每月銹蝕檢查缺點次數統計

點數的分佈，發現4至8月銹蝕缺點數量有大幅增多現象，研判4-8月份因岡山地區氣溫炎熱、陽光強烈、且即將進入梅雨季節，下雨機率增高，對於大坪作業的飛機較容易產生銹蝕，另97年5-7月缺點數較96年同期增加，研判因97年度平均相對濕度、雨量及檢驗人員熟練度等因素，造成97年5月以後起落架系、飛機構架、座艙及機身缺點數增加許多，缺點分佈情況（如圖3）

四、依據系統分類缺點：對於發現的4462項銹蝕缺點，由各專業修護人員協助依各系統分類，使各類缺點能夠正確分類至各系統，可統計各系統產生銹蝕的情況，其中無法歸類至各系統或無法辨識缺點，均計入其他類別，另統計過程發現有151項，惟因統計誤差且資料已無法查詢，故計入其他類中，於本次研討中



不予檢討，經統計分析發現起落架銹蝕頻率最高計有1992次之多、其次為飛機構架計有864次，而座艙及機身發現有360次為次數第三高(如圖4)，顯示A型機因任務特性及地理環境與位置等因素，對於訓練任務時數高、起飛/落地次數頻繁的機種，容易產生鹽份的殘留造成機件銹蝕。

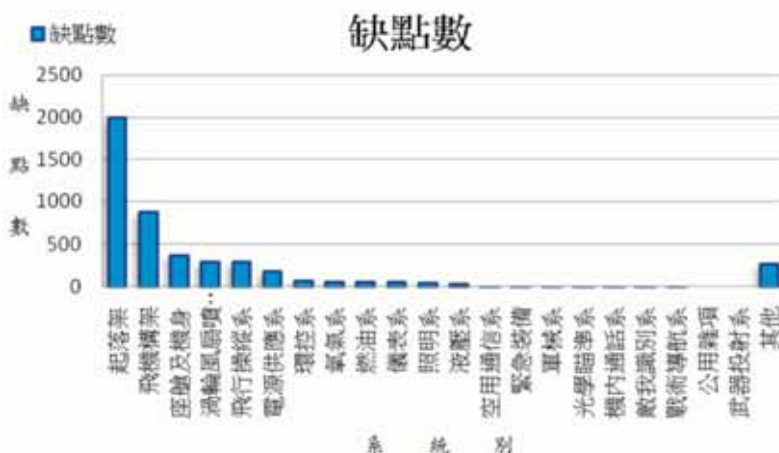


圖4 銹蝕檢查缺點分佈次數統計

陸、結構件銹蝕原因分析圖建立及肇因探討

一、飛機銹蝕肇因探討：將96至97年執行銹蝕檢查計發現4462項銹蝕缺點，彙整發現銹蝕缺點多數集中於起落架系、飛機構架及座艙及機身等系統，為每次飛行過程均會操作使用及接觸區域。採用特性要因圖(又稱魚骨圖)^{註8}，以飛機結構件為目標(魚頭)，研討銹蝕產生因素區分以自然環境、人為環境、材料因素、組裝維修過程、非金屬退化、動物及微生物及行政因素等七個方向(魚骨)，並與飛機維護單位及相關專業人員研究思考分析，找出銹蝕的產生因素(魚刺)，期能夠於本次研究找出銹蝕防治的最佳策略，擬訂「A型機銹蝕防治作業」適當作法及策略，以確保飛機結構件的可靠，探討「飛機結構件銹蝕」肇因魚骨圖(如圖5)如后：

二、銹蝕肇因與關聯性探討：

飛機的組成有上千上萬的零件組成，使得機件銹蝕的防治的問題是更加的複雜，然銹蝕的問題必須考慮很多方向及因素，如飛機在生產過程即造成銹蝕，隱藏於結構中，另環境產生酸雨或是臨近海岸，產生的銹蝕因子加速銹蝕的進行，或是結構使用鋁合金材質對於銹蝕的抵抗能力較低，或是單位執行銹蝕防治作法，無法有效防治銹蝕等因素。

藉由實際工作人員參與研討，並比對單位銹蝕防治策略，針對探討方向與



註8 S.Thomas Foster原著；戴久永審訂，「品質管理」，民91，智勝文化。

互相關聯特性一併思考，彙整成七個產生銹蝕的方向、使其研究作法條理清楚，以期能標出關鍵肇因，也就是透過探討方向，依各種現象找出銹蝕的肇因，俾擬訂研討分析找出銹蝕防治的方法。本案已完成96至97年度執行563架次銹蝕檢查，計發現4462項銹蝕缺點，經過分類統計發現銹蝕缺點多數集中於起落架系、飛機構架及座艙及機身等系統，且大部份銹蝕缺點為裸露艙區結構

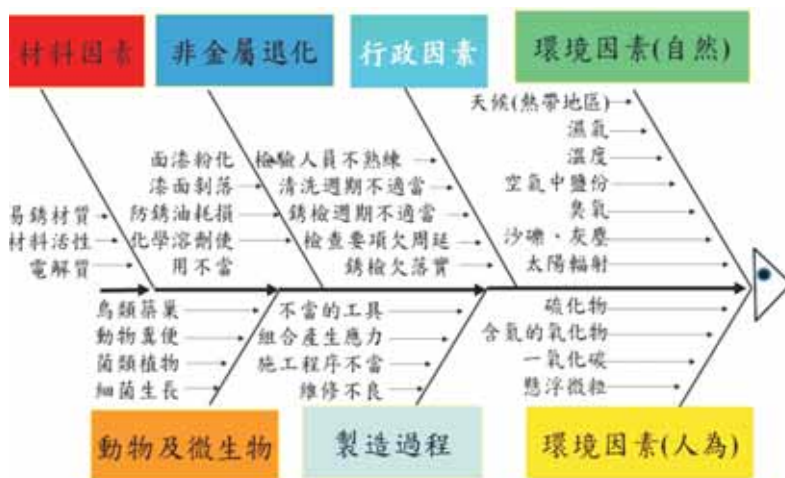


圖5 A型機銹蝕防治魚骨圖

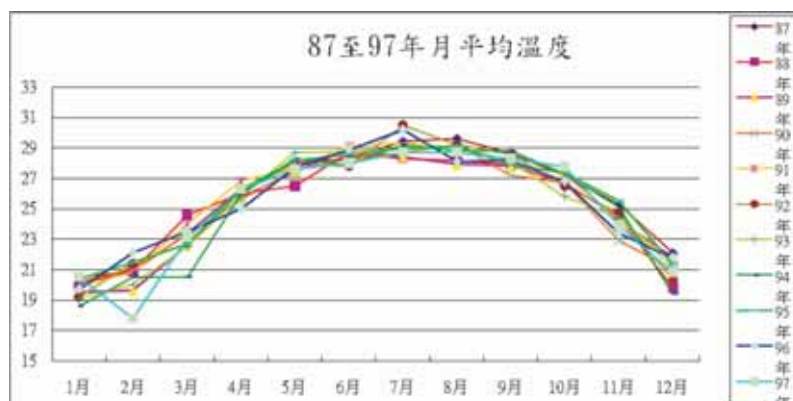


圖6 岡山地區近十年月平均溫度

輕微銹蝕、蒙皮螺絲、螺桿及螺帽等一般五金零件的輕微銹蝕。

針對肇因探討係參考修護技術文件、期刊論文及實際銹蝕防治工作的經驗彙整的討論方向，共分為自然環境、人為環境、材料因素、組裝維修過程、非金屬退化、動物及微生物及行政因素等七個方向研討，期能夠分析出飛機銹蝕的關鍵因素，擬訂銹蝕防治的最佳策略。

(一) 自然環境：

1. 氣候：岡山地區氣候特性屬氣溫高、濕度高的熱帶氣候特性(如圖6)，一年之中有七個月平均氣溫超過25℃以上(如圖7)、全年12個月平均濕度在75%以上^{【註9】}，且岡山地區距離海岸線較近，因此鹽份較多；南側有楠梓加工區、



註9 中央氣象局-南區氣象服務，「高雄站月均溫」，民98



北側有本洲工業區，所產生空氣污染物及懸浮微粒等因素，加上濕氣會造成銹蝕加速。對於飛機外部漆飾、防銹油及飛機上非金屬物質的耗損或功能退化。惟96-97年缺點統計

情況，缺點的數量自4月份呈上升趨勢，到8或9月份回復到穩定狀態，對於岡山地區氣候特性氣溫高、平均濕度高，平均氣溫4月至9月上升超過27度，

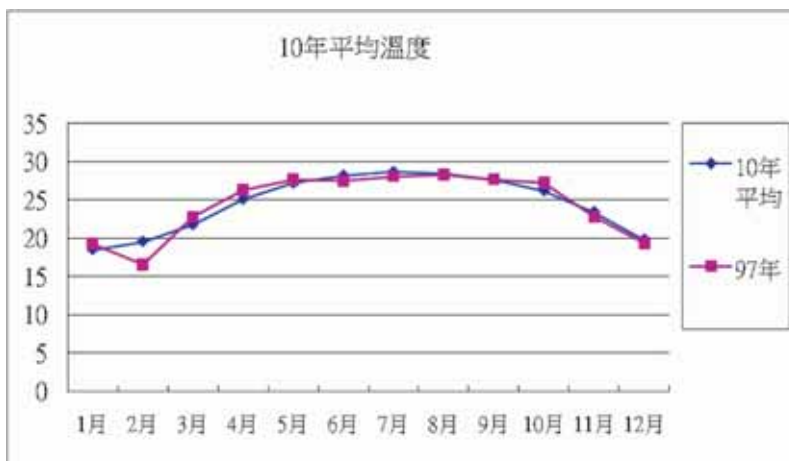


圖7 岡山地區97年與十年月平均溫度比較圖



圖8 岡山地區近十年月平均濕度

發現起落架系及飛機構架等系統最高，其缺點均為裸露艙區結構輕微銹蝕、蒙皮螺絲、螺桿及螺帽等一般五金零件的輕微銹蝕。顯見單位銹蝕防治律訂銹檢週期，飛機維護單位每日執行飛機擦拭、清洗及定期執行銹蝕檢查，與銹蝕缺點的產生有正相關性可控制銹蝕產生進度，於中度或重度缺點產生前，能適時發現予以改正。

2. 濕氣：空氣的溫度越高，容納水蒸氣的能力就越高，以年平均濕度來看，岡山地區全年平均濕度均在75%以上(如圖8)，顯示該地區常年保持在高濕度的環境，使銹蝕的環境是持續存在，並困擾飛機維護單位。

對照銹蝕檢查情況及岡山地區氣候特性，發現銹蝕檢查缺失多集中於起落架系統及飛機構架，且為一般或輕微缺點，顯見銹蝕產生與銹蝕防治策略



及岡山地區氣候特性有相關性。

3. 空氣中鹽份：由於鋁合金位於海岸地區對於鹽份的抵抗能力較小，岡山地區因接近海岸鹽份可由風吹送，將空氣的鹽份附著於飛機上，再與空氣中濕氣結合形成強烈之電解質，使金屬間於海水中電位差異越大越容易產生銹蝕，在定期銹蝕檢查發現雖然4月開使氣溫升高、銹蝕缺點亦產生相同趨勢，惟6至8月因降雨量增加，使飛機上鹽份被雨水充刷掉，使銹蝕產生減緩趨勢，故對於地理位置的關係臨近海岸鹽份(氯離子)具有一定含量，且飛機統一於大坪集體作業，並考量氣溫與雨量的關係顯示，空氣中鹽份含量與氣溫有關係，鹽份與雨量有反向關係，故飛機維護單位每日執行飛機擦拭、清洗及定期執行銹蝕檢查，可使銹蝕缺點控制在一定範圍內。
4. 砂礫、灰塵或懸浮粒子：多數區域內均存有砂粒及塵埃，以總懸浮粒子包括由煙、塵、煤灰、以固體物質或液體點滴或凝結的蒸氣型態懸浮於空氣中，對於潛藏於飛機構架內的砂礫、灰塵或懸浮粒子，在溫度高的時，像海棉般吸收水氣後接觸飛機構架。來源可能是由風吹送的土壤粒子或車輛廢氣、建築活動或工廠的煙囪。岡山地區因週邊工廠設施、火車、高鐵、高速公路經過及都市化人口集中，造成此類亦是該區易銹蝕之肇因。對於銹檢情況及飛機維護單位每日執行飛機擦拭、清洗，將飛機銹蝕情況控制適宜。
5. 太陽輻射：太陽輻射最損及材料之兩種範圍造成陽光灼傷之紫外線及使陽光感覺溫暖之紅外線。岡山地區位於北回歸線以南且屬低緯度地區，陽光直射造成氣候溫差大，且非金屬物質易受陽光紫外線、紅外線及光化效應之強烈影響，橡膠會迅速敗壞，油漆喪失其防護性，聚合物之強度及韌度降低，顏色失去光澤，基本之色呈退除，造成防護力降低。

在岡山地區為熱帶性氣候特性，對於太陽輻射會造成漆面龜裂，惟鋁合金對於高鹽份抵抗力較小，但太陽輻射造成的氣溫升高影響較明顯，故飛機維護單位每日執行飛機擦拭、清洗及檢查，可控制銹蝕產生情況。

(二)人為環境：

1. 硫化物：岡山地區距離海岸線較近、南側有楠梓加工區、北側有本洲工業區及興達火力發電廠等地理環境，產生空氣污染物及懸浮微粒非常明顯。隨著工業的進步，排放的化學物質越來越多，在燃燒石化燃料產生廢氣，造成多種的硫化物，一旦與空氣中濕氣或雨水結合，可加速銹蝕進行。

岡山地區區域內有火車、高鐵、高速公路經過及都市化人口集中，車輛加上工廠設施產生因燃燒礦物燃料的發電廠、工業鍋爐及汽車排放廢氣，使



的該地區硫化物在空氣中年平均含量較高為6.06-7.1ppb^{【註10】}，並根據氣象局雨量統計資料，發現5-9月雨量較集中，故大部分硫化物被雨水沖刷掉，惟起落架系及飛機構架部份，雨水無法直接沖刷，使銹蝕的缺點較多。

2. 含氮的氧化物：承上岡山交通繁忙、週邊工業區林立及大型火力發電廠操作時，含氮氣體便會形成，排放入大氣中。一氧化氮(NO)是燃燒過程中主要的產物，而二氧化氮(NO₂)是一種腐蝕性高和氧化能力強的淺啡色氣體，濃度高時會含刺激性酸味，在陽光照射下會生成臭氧，該地區年平均含量約19.55~20.90ppb較其他地區為高，此物質散發於空氣中配合濕氣或雨水，並與硫化物一同造成銹蝕加速。

根據氣象局雨量統計資料，發現5-9月雨量較集中，故大部分空氣汙染物易被雨水沖刷掉，惟起落架系及飛機構架部份，雨水無法直接沖刷，使銹蝕的缺點較多。

3. 一氧化碳(CO)：是無色、無嗅、無味的氣體，是在不完全燃燒碳的情況下產生的副產品。承上岡山交通繁忙、週邊工業區林立及大型火力發電廠操作時，該地區年平均含量約0.47~0.64ppm，排放的化學物質越來越多，只要濃度超出標準便是污染。這些污染物之組合導致非金屬材料之敗壞及金屬之嚴重銹蝕。

根據氣象局雨量統計資料，發現5-9月雨量較集中，故大部分空氣汙染物的一氧化碳易被雨水沖刷掉，惟起落架系及飛機構架部份，雨水無法直接沖刷，使銹蝕的缺點較多。

(三)材料因素：

1. 易銹材質：飛機結構因需要設計為高強度、重量輕，所以大量使用鋁，惟純鋁是軟而弱的金屬但有良好的抗腐蝕性^{【註11】}，而將其製成合金的目的係要增加其強度，以利飛機結構使用滿足設計所需強度，在岡山地區因地理位置的關係，接近海岸線、工業區及火力發電廠等汙染，惟鋁合金對於工業區空氣可產生極佳的抵抗性，但是對於海岸地帶大氣抵抗性較弱，且硫化物加上水氣產生二氧化硫，容易造成鋁合金銹蝕。

且單位定期飛機清洗並未執行起落架系統清洗，僅由飛機維護人員採擦拭的方式執行，容易造成遺漏或無法擦拭清潔妥，使影響銹蝕因素殘留於飛機上加速銹蝕進行。



註10 環保署，96年空氣品質報告，民97

註11 飛機武器系統之清洗與銹蝕控制，國防部空軍司令部，民國九十三年四月三十日。



2. 材料活性：鋁合金是較輕之金屬，對於空氣與水具有良好的腐蝕抵抗性，並具有良好的電和熱傳導，在金屬中具有非常活性，鋁之所以具有良好腐蝕抵抗性，係由純鋁氧化之薄膜有較佳之腐蝕抵抗性，一旦含有少量雜質可能造成晶粒間銹蝕。因此位於無汙染地區，鋁具有良好之腐蝕抵抗性，惟因在岡山地區因地理位置的關係，接近海岸線、工業區及火力發電廠等汙染成分複雜，使鋁合金銹蝕情況加速產生。

綜上，飛機於設計時即將材料活性納入考量，惟後天環境等因素造成或加速銹蝕進行。

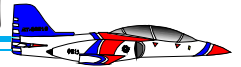
3. 電解質：岡山地區為熱帶氣候地區，平均溫度約 28°C ，平均相對濕度82.675%，且日夜溫差大容易造成水氣集中，加上地理位置空氣汙染成分複雜，使濕氣或水氣與鹽份及硫化物等形成電解質，加上飛機部份艙區密閉或不易清潔擦拭，水氣及鹽份或空氣汙染物(含氮化合物、一氧化碳等)殘留，形成電解質加速銹蝕產生。

(四)組裝維修過程：

1. 不當使用工具：岡山地區由於地理環境及熱帶氣候特性，對於銹蝕的侵擾一直存在，所以各項修護文件要求，只要發現銹蝕，就必須將其除銹，然使用的工具影響除銹及未來防銹的效果；除銹係依飛機區域及除銹方法不同，而有所不同。

在除銹工具對於輕度銹蝕，可使用任何材料執行除銹；而中度銹蝕則以300號砂布或更細的砂布及機械工具以氧化鋁的磨輪使用，必須要小心避免損傷其他未損壞區域。由其注意在鋁合金表面不可使用鋼質絲絨及金剛砂磨輪等，避免鋼質晶粒鉗入鋁合金，導致銹蝕損壞。

2. 組合過程產生應力：純鋁是質軟並且對應力腐蝕具有免疫的金屬，然需要將鋁運用於飛機結構上，必須運用鍛造、擠製、合金或熱處理等處理程序，將其強度、硬度增加，使其符合飛機結構上需要之強度的材料，但經過這強度增加的過程，就會在材料中產生內應力，必須將其適當的釋放，使用一段時間殘留應力造成在結構方面使零件之重要區域內銹蝕發展更為快速。
3. 施工程序不對：在鋁合金材料上發現銹蝕，就必須將其除去，而除銹程序必須小心謹慎，避免造成未受損部位的損害；故對於銹蝕區域的除銹程序概述如后：
 - a. 產生銹蝕區域清洗、除油漬。
 - b. 以300號鋁合金砂布，小心將銹除去。



- c. 除銹完成後，確實將金屬粒子及磨料清理乾淨
 - d. 使用表面鋁化劑(ALODINE)，使該區域產生鋁合金薄膜，產生防護效果，切記在完成薄膜生成後以清水洗淨，避免產生殘留加速銹蝕產生。
 - e. 噴塗底漆、面漆，完成除銹及復原。。
4. 維修不良：在除銹及防銹有一定的工具及程序，如果未依合格的工作程序及工具，執行除銹會造成加速銹蝕反效果，例如：使用不當除銹工具、未依合格程序執行除銹、未執行轉化即噴塗底漆或轉化劑未確實清潔妥等不合格的程序，會造成防銹效果不佳或加速銹蝕進行等副作用。

(五) 非金屬退化：

- 1. 面漆粉化：在陽光下，天然及合成兩種橡膠會迅速敗壞，長期曝曬後，塑膠變暗，油漆喪失其防護性，而面漆飾一不溶性顏料，配加具有腐蝕抑制功能之底漆，可有效防治金屬與水氣接觸，然油漆變質的速率，與其曝露之特定空氣與污染量有關、天候因素等有密切關係，因長時間日照造成漆面退色及粉化，故飛機的外表漆飾在一段時間後，就必須將舊漆除去，重新噴上新漆，已恢復原有之防護效果，岡山地區屬熱帶氣候地區日照及氣溫都比北部來的高，所以對於面漆的耗損也較明顯。
- 2. 漆面剝落：A型機為噴射高級教練機，速度快、飛行高度高，所以停機於地面時，太陽光的紅外線與紫外線會造成損壞，而飛行過程因溫度變化過大使漆面產龜裂現象，或是飛行過程因穿雲造成漆面損害等因素造成漆面損壞，輕微者為漆面龜裂，嚴重則為漆面剝落必須補漆，一旦漆面產生剝落，必須依合格程序將漆面補妥，以恢復既有防護力。
- 3. 防銹油耗損：飛機部位各有不同材料，其中起落架系統大部分為鋼製件，所以部分鋼製件無法以面漆保護，就必須以防銹油保護，為防銹油會因飛行過程風吹造成損耗，或因天候及日照關係使防銹油減少，為求最佳防護效果，必須時常補充防銹油的施塗。
- 4. 化學溶劑使用不當：飛機上各部材料分別有最佳之防護材料，如鋁合金在施塗底漆前，必須先將鋁合金表面轉化後，將轉化劑清除，此過程必須注意不可損傷心建立的薄膜及確實清除轉化劑，避免殘留加速銹蝕進行；另紅丹底漆僅可用於鐵製品，不可用於鋁、鎂合金等。

(六) 動物及微生物：

- 1. 鳥類築巢：機場腹地較大且有較空曠的場地，因此會有較多的鳥類棲息，就有部分鳥類會在飛機上築巢，築巢後會產生糞便、食物殘渣等會造成東西腐



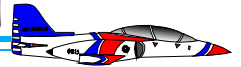
化產生酸性物質，進而損壞飛機結構。

2. 動物糞便：飛機停放於地面，因目標較明顯或是停放於機棚內，鳥類飛過或在棚上橫樑休息，常會有鳥類排泄物落於飛機蒙皮上，如此會侵蝕飛機蒙皮的漆飾及飛機蒙皮結構等。
3. 菌類植物：岡山地區氣溫高、濕度高且早晚溫差大，提供菌類絕佳的生長環境，在飛機結構密封，不易檢查的地方，如調溫包艙、環控線路密集區域等容易滋生菌類，使其菌類生長會分泌酸性物質造成侵蝕該區域產生銹蝕。
4. 細菌生長：在飛機某些部位會有較高的濕度或水分，該區如果有細菌存在或是外來水氣引入，在該區生長會產生，排泄物、分泌物等酸性物質，也會造成機件銹蝕。

(七)行政因素：

1. 檢驗人員熟練性：執行銹蝕檢查係由納編單位品質檢驗人員成立「銹蝕檢查小組」，依據技術文件、檢驗樣本及各相關規定擬訂的檢查要項執行檢查。惟因執行檢查的品檢人員會因任務及工作負荷情況，會有不同人員執行銹檢，造成人員執行的熟練度不同，檢查效果也不同。
2. 清洗週期適當性：本大隊屬於中部嚴重性銹蝕環境，依據修護技術命令規定，每架飛機必須定期每月清洗乙次，參考機隊數量平均每天執行2架機清洗作業，始可滿足每月必須執行清洗乙次，期間遇雨天則改用全機擦拭方式執行，影響執行效果。
惟飛機清洗僅針對飛機外部執行清洗，上有部分艙區及起落架艙無法清洗，且飛機維護人員定期將飛機分區域執行以腐蝕抑制劑擦拭，但仍無法使所有區域完全擦拭清潔，且部份艙區未開啟無法執行擦拭。
3. 銹檢週期適當性：原製造廠家技術命令規定每60天執行銹蝕檢查，檢驗人員依據銹蝕檢查檢查要項執行銹蝕檢查，檢查結果大部分均為一般輕微銹蝕並參考王助理教授所著「7000系列鋁合金於本島空軍基地氣候銹蝕行為之研究」對於面漆、底漆、表面陽極化等鋁材，均得到不錯的防護效果^{【註12】}，故銹檢週期在不增加工作人員負擔情況下，應可滿足防護需求。
4. 檢查要項周延性：銹蝕檢查係依據技術文件、檢驗樣本及各相關規定擬訂的檢查要項執行檢查，惟執行人員為飛行線維護人員且執行銹檢工作，僅將部分艙區打開檢查，使部份艙區無法配合銹蝕檢查開艙檢查，使銹蝕情況隱藏

註12 助理教授王心靈，空軍中校陳唐徵，助理教授江志煌，士官長徐錫聰，7系列鋁合金於本島空軍基地氣候銹蝕行為之研究，空軍學術雙月刊。



無法發現，因此會有缺點數過於集中於某系統及區域，或是始執行成果不如預期的情況。

5. 銹蝕檢查落實性：執行銹蝕檢查作業平均每天須執行1.2架次，在每天飛訓任務頻繁加上每天定期檢查工作，使工作人員工作負荷加重，致銹蝕檢查工作落實程度待加強；本項工作係由單位修護室主任及士官督導長督導銹檢工作，確實要求執行人員落實檢查，故此項忽略不予考量。

柒、關鍵因素解決方案

本次研討係依魚骨圖配合近二年飛機結構件銹蝕缺點統計分析資料，將A型機銹蝕情況研究，前已完成逐項分析，發現可歸類為四項重點，擬訂改善方案：

- 一、環境因素：岡山地區為熱帶性氣候特性，歸類為「中度嚴重性銹蝕地區」，為本項均為自然、天候環境，無法操控改善及週邊工業建設，如採取將汙染源遷移，將耗費鉅額經費及較長作業期程，且回收效果與支出無法達到平衡；另考量鋁合金材料特性，對於鄉村、都市和工業區大氣空氣及蒸餾水具有較佳之抵抗，但是在海岸地區大氣抵抗性較小。

根據96-97年銹檢缺點係以起落架系統及飛機構架為主要缺點，經檢討主要為周邊工業區及緊鄰海岸等環境因素造成，為改善上述銹蝕侵擾，採取長期要定期執行飛機清洗及短期要加強落實飛機以腐蝕抑制劑分區擦拭，可有效防治銹蝕作業，減緩銹蝕產生。

- 二、組裝維修過程及行政因素：飛機結構使用之鋁合金，其特性為質輕、強度高以及大分環境的空氣成分有良好之腐蝕抵抗性，但是在組裝或修理的過程，一不注意或是未依規定執行清潔及修理，都可能造成銹蝕的加速進行，如未依規定執行轉化作業、噴漆前確實清潔油汙等，另在組合過程中，將其他金屬粉末清潔妥殘留於結構內，亦會造成銹蝕；銹檢執行期程訂定、銹檢檢查要項不周延以及銹檢作業未落實等行政因素，A型機現有機數約50餘架，依規定定期每60天須執行銹檢，以確保飛機結構件狀況，故約每天須執行1-2架，對於工作負荷及人員調度將有困難。

根據96-97年銹檢缺點以起落架系統及飛機構架為主，對於飛機結構修理程序及平日飛機維護工作等加強重點，綜上歸納四個重點：

- (一)銹蝕檢查小組應指派專責人員執行，考量機對現況銹蝕檢查一週期約二個月，平均每天必須執行1~2架次，故採取專責人員執行並配合檢驗範本，可以明確及統一檢查標準，減少因人員誤差使檢查成果失真。



(二)專責執行銹檢人員應包含飛行線維護及場站各專業，因各專業較能掌握相關系統艙區情況，並了解較易銹蝕區域加以關切，以確保銹檢執行周延，俾能發現潛存於飛機結構之銹蝕，減少隱藏銹蝕的進行影響飛安。

(三)銹蝕處理人員應加強本職學能訓練，各項工作確依程序、步驟、要領等標準程序執行修理，以確保飛機結構防銹效果。

(四)飛機維護人員應落實以腐蝕抑制劑執行飛機全機擦拭及各階段飛機防銹作業，期望在不增加檢查項目，要求平日執行維護作業，達到飛機維護作業的目的。

三、動物、微生物及非金屬退化：岡山地區屬熱帶氣候地區，平日陽光日照充足，紫外線對於飛機外表漆飾容易產生光化效應，而紅外線會造成飛機外部漆飾會因溫度差異或高溫造成漆面龜裂等情況減低銹蝕防護能力，故定期將飛機外部漆飾去除，檢查飛機蒙皮及內部結構情況確實有其必要。

參照96-97年銹檢缺點大多以起落架系統及飛機構架為主，避免飛機構架因動物及微生物的侵擾，要求基地維護勤務人員，加強鳥類及場面上動物驅離，另要求飛行線維護人員，確實執行飛前中後檢查及飛機擦拭，對於停機過久飛機將開放之艙區或蓋板確實檢查及密封妥，以避免動物的侵擾。

四、材料因素：鋁合金為質輕、銹蝕抵抗能力佳之金屬，且王助理教授曾對於7系列鋁合金研究發現，完成面漆、底漆及陽極化處理之金屬，在一年內僅會產生表面的結晶尚未發現銹蝕。

惟96-97年銹檢缺點係以起落架系統及飛機構架為主要缺點，但多數缺點均為一般及輕微銹蝕缺點，綜上材料因素將銹蝕歸類為二個小結：

(一)使用腐蝕抑制劑擦拭飛機以降低金屬活性：因為金屬有恢復至其自然狀態之趨勢，常會因飛行或是大氣中靜電或是材料的活性差異，產生電位差異使銹蝕持續進行，故持續要求飛行線維護人員去依規定期程執行飛機擦拭及清洗，以減少銹蝕的產生。

(二)對於無法開啟或是不常開啟的艙區，研發新的材料隔絕銹蝕因素的侵擾：因環境因素、材料本質及A型機係80年代設計產品，製造技術並非現代技術的純熟及標準化，所以材料本質加上環境屬於中度嚴重性銹蝕環境，飛機結構件銹蝕的情況是無時無刻持續進行中，惟有隔絕銹蝕產生要素始能停止銹蝕，故考量完成漆飾後增加以奈米材料噴塗於隔框內，以隔絕水氣、鹽份、硫化物、粉塵及空氣汙染物等，使銹蝕無法持續進行或減緩銹蝕速度，待專業工廠執行C/T時確實處理，確保飛機結構件的可靠。



捌、結論

金屬有回復到自然狀態的趨向，而台灣屬海島型氣候，岡山地區具有熱帶性氣候特性，因此岡山地區歸類為中度嚴重性腐蝕地區，並經過96-97年的銹蝕檢查及採用魚骨圖分析銹蝕產生原因，得到下列三點結論：

- 一、氣溫高、濕度高使飛機結構一直處於容易銹蝕的環境，然環境因素無法控制及改善，且銹檢清況大多數為輕微銹蝕缺點，顯示單位銹蝕控制情況良好，未來應持續落實以腐蝕抑制劑擦拭飛機內外表面。
- 二、銹檢情況大多集中於部分系統，應要求飛行線人員落實每日檢查，並檢討銹檢執行人員專業及檢查手法，建立檢驗樣本，依據程序、步驟、要領等標準程序執行檢查，避免造成檢查情況廣度不足，使嚴重銹蝕未被發現，錯過最佳處理時機。
- 三、鋁合金為質輕、銹蝕抵抗能力佳之金屬，但是面對岡山環境金屬材質易產生銹蝕，對於每日檢查的艙區應勤於擦拭，以清除銹蝕因素，對於不常開啟艙區，檢討採用高科技材料(如：奈米塗層)，以隔絕水氣、鹽份及汙染物等銹蝕因子，確保在下次週檢執行時，結構能夠得到妥善的保護。
- 四、銹蝕防治作業應配合定期之量化統計數據，俾檢討銹蝕作業的妥適性，已達銹蝕防治之目的。本文統計銹蝕防治作業之結果，並進行其銹蝕防治策略、週期與作法之探討，可作為銹蝕防治作業之妥適性持續探討之參考。

綜上為確保飛機能夠穩定可靠的執行任務，主要需維持機務妥善，在飛機修護各項系統，其維修工時都可順利掌握，惟飛機結構損壞無法迅速修復，須花費大量人力及工時執行修護，所以飛機結構件的銹蝕防治工作會因環境、人員訓練、材料而除銹方式略有不同，各單位應找出各單位銹蝕因子，針對問題加以執行銹蝕防治工作，如此才能達到事半功倍效果。

作者簡介

空軍少校 朱興輝

經歷：飛修官、生管官、飛檢官、分隊長、飛參官、主任。學歷：空軍機械學校專科84年班、國防管理學院後管班40期、義守大學工業工程與管理學系94年班、中華技術學院飛機系統工程研究所在職專班。現職：空軍官校第十一修護補給大隊飛行線維護中隊修護室主任。