

海

2015年10月25日香港註冊噴  
射水翼高速客船“HORTA”  
(海皇星)於小鴉洲西北水域  
觸碰水下不明物體的調查報告



香港特別行政區政府  
海事處海事意外調查組

2016年12月28日



## 調查目的

此事故乃按照2008年5月16日通過的國際海事組織海上安全委員會決議MSC.255(84)所載的《海上事故或海上事件安全調查國際標準和建議做法規則》（《事故調查規則》）調查和公佈。

根據《商船條例》281章、《商船(安全)條例》（第369章）、《船舶及港口管制條例》313章或《商船（本地船隻）條例》548章相關規定，海事處海事意外調查及船舶保安政策部調查這宗意外事故，旨在確定事發經過和肇事原因，以期改善海上人命安全，避免日後再次發生同類事故。

本報告所作的結論，旨在認定導致事故的不同因素。我們無意將過失或責任歸咎於任何組織或人士，除非為達到上述目的而有需要這樣做。

海事意外調查及船舶保安政策部不會牽涉於海事處可能對這宗意外事故所採取的任何檢控行動或紀律處分。

## 目 錄

	頁 碼
1. 概 要 .....	1
2. 船隻資料 .....	2
3. 證據來源 .....	4
4. 肇事始末 .....	5
5. 證據分析 .....	9
6. 結 論 .....	22
7. 建 議 .....	23
8. 送交文件 .....	24
附件一 《關於海皇星後水翼固定保險銷斷裂故障之分析報告》 .....	25

## 1. 概 要

- 1.1 2015 年 10 月 25 日 1805 時，噴射水翼高速客船海皇星號（海皇星）離開澳門前往香港，船上載有乘客 163 名，船員 11 人。船長，大副，輪機長和夜視員共 4 人在駕駛室內當值，船長負責駕駛，大副協助監測雷達目標及目視瞭望，夜視員使用夜視儀掃視海面和瞭望，輪機長監察船上機器的運作情況和守聽甚高頻無線電電話通訊。
- 1.2 約於 1839 時，海皇星以翼航模式航行，沿著小鴉洲西北高速船航道東行分道內右側以  $078^{\circ}$  的航向和 39.5 節高速行駛，至“小鴉洲北”安全水域浮標以西水域 0.62 海里，海面一切正常，海皇星突然觸碰到水下不明物體，並導致主機自動停車，船體由翼航飛行狀態急速墮落水面，船速在十多秒鐘內由 39.5 節降到 14.5 節，巨大的慣性導致部分乘客和船員跌倒或被拋出其座位而受傷。
- 1.3 船長立即命令大副報告管理公司，並親自報告海事處有關情況。稍後，海事處、水警和消防處的船隻，加上政府飛行服務隊的直升機相繼到達現場救援，把傷者送往各醫院。於 2356 時已將全部乘客和傷者撤離海皇星。
- 1.4 事故造成共 126 人受傷，其中 6 人傷勢嚴重。海皇星船艍左右底部破損進水、後水翼有撞痕，後水翼系統安全插銷斷開，左右主機艙結構及主機座受損變形，主機滑油系統損壞。事故沒有造成油污染。
- 1.5 對本事故的調查發現，意外並導致大量人士受傷的主要肇事原因可能如下：
  - 船隻在高速航行時，觸碰到水下不明物體導致後水翼的安全插銷斷開，後水翼向後擺而導致船隻失去升力並急速墮落水面停下和令船體損毀；
  - 船上人士沒依照船長指示在航行時繫上安全帶，導致他們被船隻急降時所產生的巨大慣性拋離座位受傷；及
  - 船上人士的行李及個人物件沒固定好，導致船上人士被散落物件撞傷。

## 2. 船隻資料

### 2.1 噴射水翼高速客船 “HORTA” 海皇星 詳情

國籍	:	中國香港
船籍港	:	香港
船隻名稱	:	HORTA 海皇星
IMO 編號	:	7923251
船隻類型	:	A 類載客高速客船
船舶類型	:	單體噴射水翼船 (MONO HULL JETFOIL)
航行區域	:	內河航限
船體材料	:	鋁合金
水翼材料	:	以不鏽鋼為主
總噸位	:	267
淨噸位	:	98
長度 (總)	:	23.98 米
型寬 (總)	:	8.53 米
型深	:	2.59 米
允許運載總人數	:	214 人 (202 名乘客，12 名船員)
主機	:	兩台燃氣輪機 (Gas Turbine/Detroit Diesel Allison 501-K20A)
輪機功率 (總)	:	5590 千瓦 (2795kW x 2)
推進裝置	:	燃氣輪機噴水推進 (Gas Turbine-Waterjet)
造船廠名稱	:	波音公司 (Boeing Aerospace Company)
建造年份(安放龍骨)	:	1979 年
船舶所有人/經營人	:	信德中旅船務管理有限公司



圖 1. Horta（海皇星），翼航狀態（來自網路）。

2.2 海皇星是一艘單體噴射水翼高速客船，由美國西雅圖波音公司製造。她由兩套燃氣輪機噴水推進，總功率達 5,590 千瓦。其船體外殼為鋁合金製造，前後帶有以不鏽鋼為主制造的水翼以支撐高速翼航模式，正常航速約 40 節。

### **3. 證據來源**

- 3.1 “海皇星”的船長及其船員的會面記錄；
- 3.2 “海皇星”的管理公司提供的資料；
- 3.3 香港海事處船隻航行監察中心提供的資料；
- 3.4 海事處海港巡邏組提供的資料；
- 3.5 香港海事處海道測量部提供的水道探測報告；
- 3.6 海事處客船安全組損壞檢驗報告；及
- 3.7 香港天文台提供的當天天氣資訊。

## 4. 肇事始末

本文時間為香港本地時間 (UTC+8)

- 4.1 2015 年 10 月 25 日 1805 時，香港註冊噴射水翼高速客船 “Horta”（海皇星）按夜航操作要求完成開航前檢查後，離開澳門外港碼頭前往香港，船上載有 163 名乘客和 11 名船員。
- 4.2 在駕駛室內，船長負責駕駛，大副協助監測雷達目標及目視瞭望，夜視員使用紅外線夜視儀觀察海面情況以協助瞭望，輪機長監察機器的運行狀況和守聽甚高頻無線電話通訊。
- 4.3 於 1810 時，海皇星船體升離水面以翼航模式航行。於 1832 時經過大嶼海峽，船速約 39.0 節，航向  $064^\circ$ 。
- 4.4 於 1836 時，海皇星以左舷橫過“分流”安全水域浮標並轉入小鴉洲西北高速船航道，東行分道靠右側航行，船速約 39.5 節，航向  $080^\circ$ 。（參考圖 2）



圖 2. 海皇星轉入小鴉洲西北港澳高速船航道東行分道右側航行。

- 4.5 於 1838 時，海皇星繼續在上述航道東行分道靠右側正常行駛，船速保持在 39.5 節，航向輕微向左轉至  $078^{\circ}$ 。船長和大副皆留意著左舷前方、西行分道內向西航行船隻的動態及固定的“小鴉洲”北安全水域浮標，確定該水域一帶沒有對本船航行安全構成影響。
- 4.6 約於 1839 時，上述在西行分道內那艘西行船隻剛駛過，當時海皇星位於北緯  $22^{\circ}11.619'$ ，東經  $113^{\circ}53.752'$ ，距“小鴉洲”北安全水域浮標約 1,150 米（0.62 海里），距小鴉洲北角約 1,300 米（0.7 海里）。海皇星的航速仍然維持約 39.5 節，航向  $078^{\circ}$ ，航行於小鴉洲西北的東行分道內右側，沒有偏航。（參考圖 3）

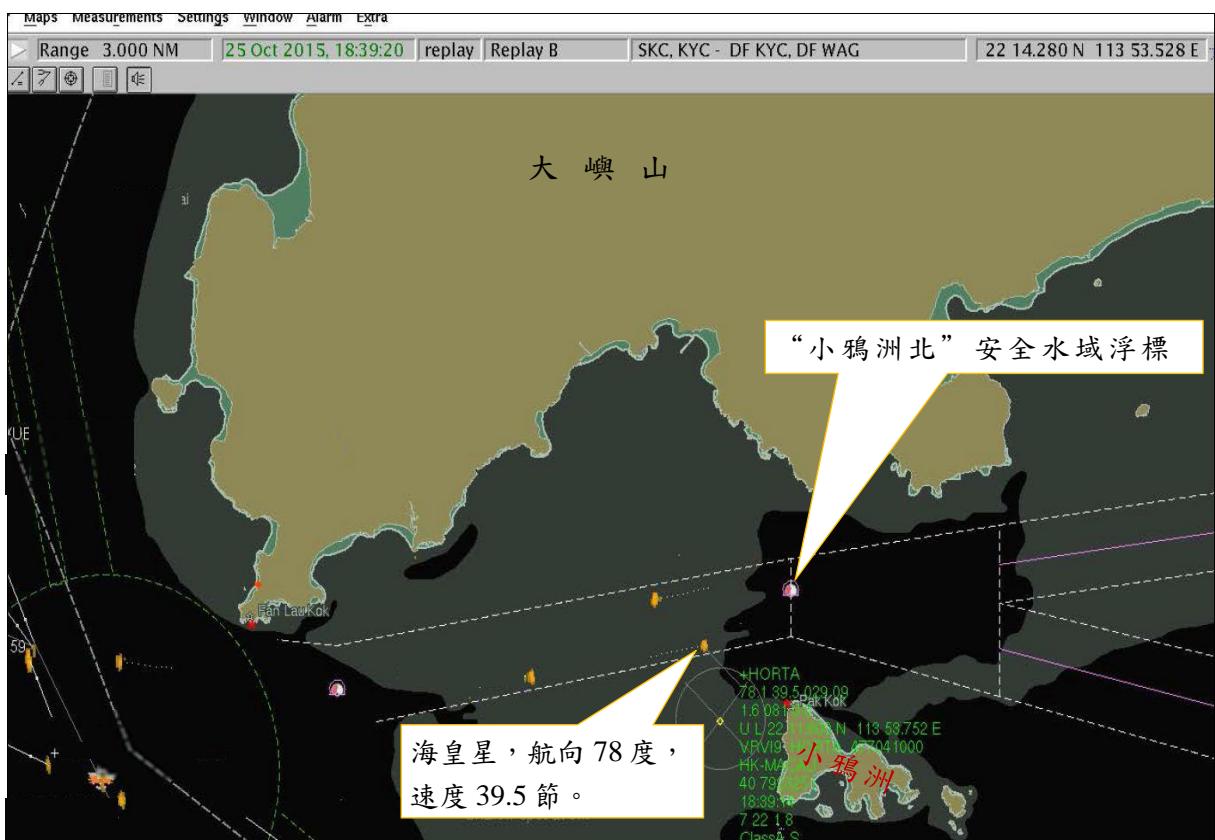


圖 3. 事故發生前，海皇星在小鴉洲西北的東行分道內正常航行。

- 4.7 此時，海皇星突然出現明顯的抖動，船隻急速從翼航模式墮落水面，接著船體發生一起強烈震動，大部分乘客被拋離其座位及被散落物件撞擊受傷，同時船速減慢，船隻失去電力供應，兩台主推動機自動停止運行。

4.8 船隻航行監察系統記錄到其航速在十多秒鐘內迅速降到 14.5 節。海皇星跌回水面後航速進一步急降，到約一分鐘後的 1840 時左右，航速降至 2 節以下，然後降至對水速度為零。

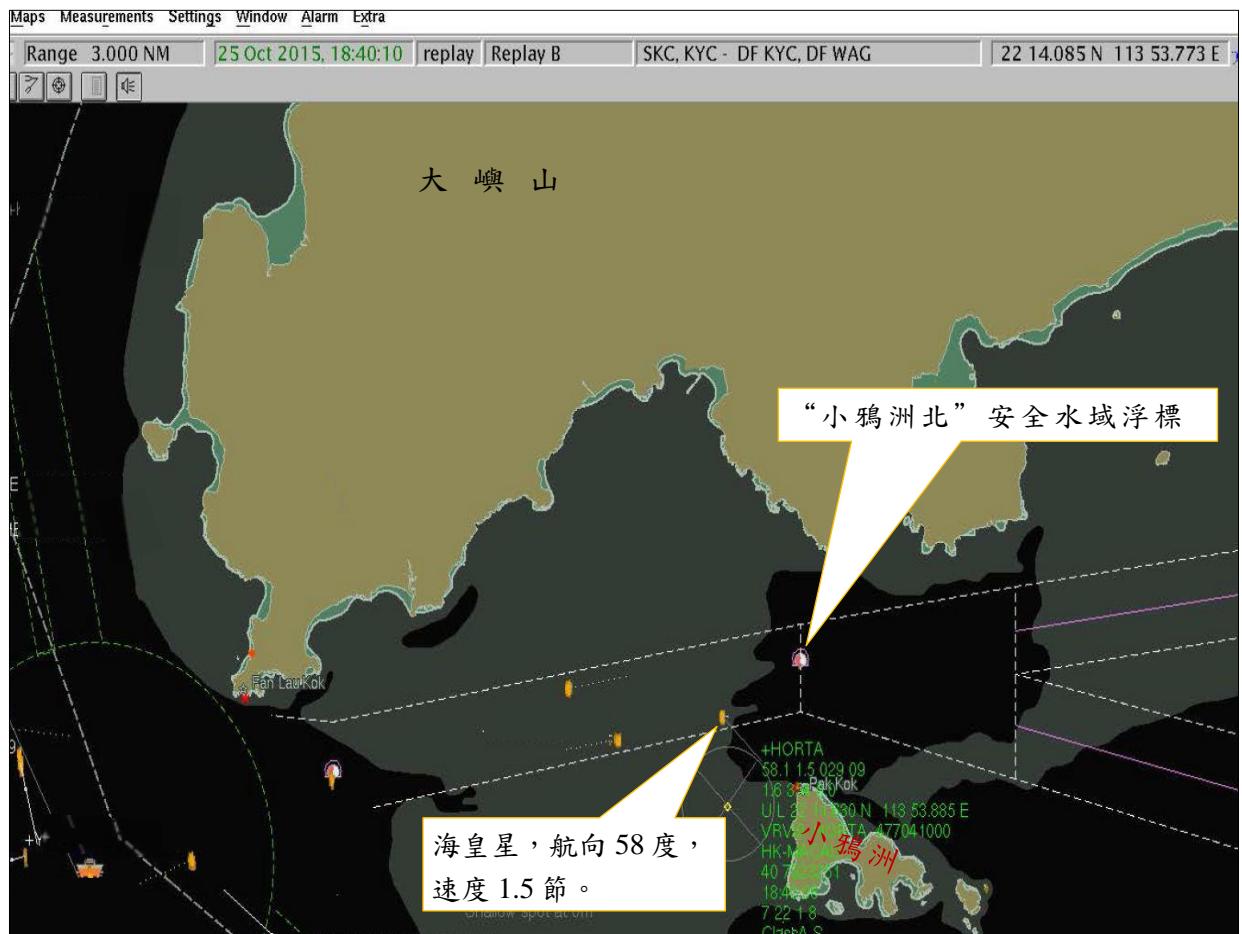


圖 4. 事故發生後，海皇星船速急降至 2 節以下

4.9 大副在船長指示下，即時使用甚高頻無線電話向公司報告船隻可能觸碰到水下不明物體，請求公司協助。同時，船長使用公共廣播系統，通知乘客船隻可能觸碰到水下不明物體導致事故，並安撫乘客的情緒和要求各人穿著救生衣等。輪機長在駕駛室留意到蓄電池系統已自動合上並在配電中，兩台發電機仍在轉動，檢查其正常後，他馬上合上發電機電閘，十幾秒鐘後恢復全船供電。及後出現第 15 號艙（右主機艙）和第 16 號艙（左主機艙）的艙污水高水位報警，輪機長馬上報告船長，並按船長指示與大副前往機艙檢查進水情況。夜視員也按船長指示往各客艙查看乘客的情況。客艙內大部分乘客受傷，有些乘客的傷勢比較嚴重。沒有受傷的或部份傷勢較輕微的乘客協助船員進行包紮、安撫乘客和維持秩序。

4.10 船長立刻查看周圍水面，但沒有發現有異常物。他隨即以船上甚高頻無線電對講機報告海事處船隻航行監察中心有關本船情況，並請求協助。輪機長檢查完左右機艙後報告船長兩個機艙已經進水，右機艙水位至主機底部，

左機艙水位至機艙走道平台。船上的其它艙室均正常。輪機長啟動排水系統和手提式水泵排水，控制機艙的浸水情況確保船舶穩性。

- 4.11 於 1902 時左右，水警輪、消防處救援船以及政府飛行服務隊直升機相繼到達現場進行救援行動，海事處巡邏船隨後亦到達現場協助救援。於 1935 時，水警和消防處人員開始將傷者分流送往各醫院。於 2356 時所有船上人員從船上撤離。海皇星隨後由公司安排的兩艘拖輪拖帶返回公司船廠碼頭。
- 4.12 事故造成 126 人受傷（包括 4 名船員），當中 6 人傷勢嚴重。事故沒有造成油污染。
- 4.13 在船廠的船排上檢查發現，海皇星船艉左右底部破損進水、艉部水翼有撞痕，水翼系統的下剪力安全插銷及上剪力安全螺杆撕斷，左右主機機艙結構及主機底座受損變形，主機潤滑油系統損壞。另外，前水翼中柱根部的莢殼(POD)艉部右後側也發現有輕微擦傷痕跡，但估計不是在這次事故中產生的。

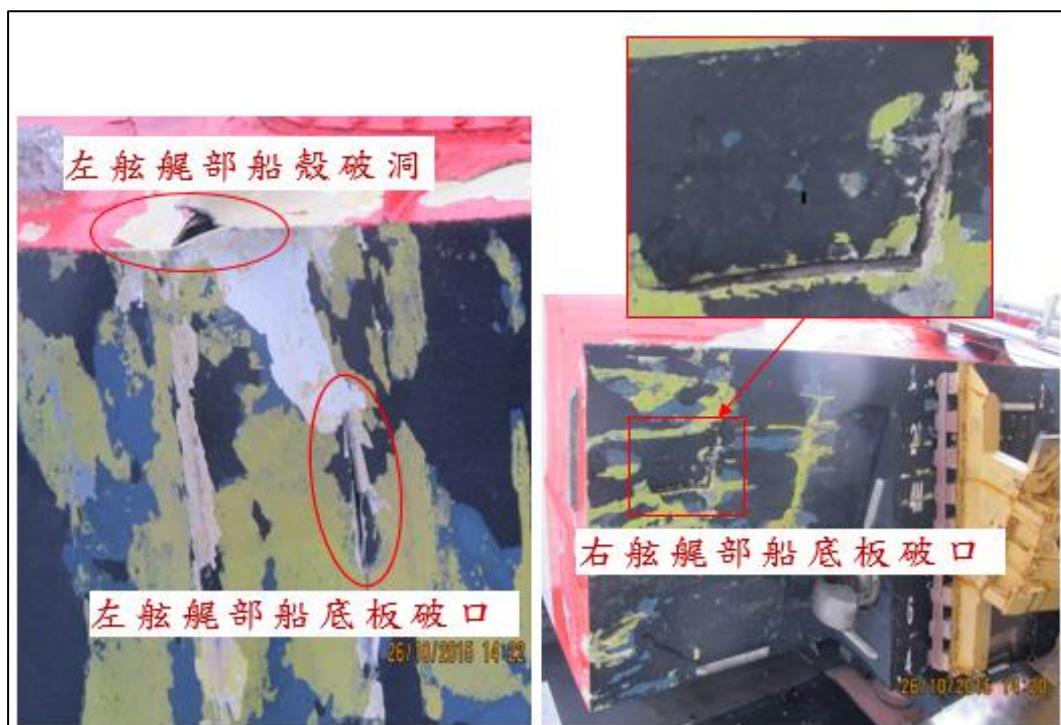


圖 5. 事故發生後，海皇星左右舷艉部船殼和船底板變形及破損

## 5. 證據分析

### 船舶和船員

- 5.1 海皇星是一艘香港註冊的鋁合金單體水翼 A 類高速客船，於 1979 年由美國西雅圖波音公司建造。其乘客定額人數為 202 人，全船可以最多乘載 214 人。事發當日，該船所有的法定證書（包括高速船安全證明書，營運許可證等）皆為有效。
- 5.2 按最低安全人手編配證明書的要求，海皇星船上配員包括船長、大副及輪機師各一名。另外，由於是夜航班次，船上額外配置夜視員一名。各高級船員皆持有有效適任及類型級別證明書。此外，船上還至少編配 3 名水手和 2 名艙務員，均持有所需的有效訓練證明書，以滿足最低安全人手編配證明書的要求。
- 5.3 事故發生時，海皇星的駕駛室內的當值船員包括船長，大副，夜視員和輪機師。客艙編配有 3 名水手和 4 名艙務員，均持有所需的有效訓練證明書，並滿足最低安全人手編配證明書的要求。
- 5.4 海皇星的船長於 1978 年開始成為海員，並於 1988 年以大副資格加入海皇星的高速船管理公司（管理公司）工作至 1990 年升任為船長。他有超過 25 年的駕駛高速客船往返香港和澳門的經驗。
- 5.5 大副在遠洋輪船上服務超過 10 年，於 1995 年加入管理公司一直任職高速客船大副。他有 20 年任職高速客船大副的經驗。
- 5.6 輪機師在管理公司的高速客船上服務了 8 年，其中任職輪機師約 4 年。
- 5.7 夜視員在遠洋輪船上服務超過 20 年，曾任職遠洋輪船二副。他於 1994 年加入管理公司，於 1999 年取得夜視員資格並任職至今。
- 5.8 所有駕駛室內的操作人員皆持有所需的有效訓練證明書並有豐富的經驗。

### 海皇星的航線，航行軌跡、航行水域及不明物體

- 5.9 海皇星航行香港與澳門之間的航線。肇事時，該船的航次是從澳門外港碼頭出發，按管理公司制定並推薦實施的計畫航線，海皇星橫過大嶼海峽，經小鴉洲北航道返回香港。計畫航線的中段，由分流角到交椅洲西南設定了推薦分道航行制，主要供往返香港與澳門的高速船使用。海事處船隻航行監察系統記錄海皇星的航行軌跡顯示（見圖 6），事發前，海皇星航行於該計畫航線上。事發時海皇星的位置亦在該推薦分道航行制的東向航行分道內，位於小鴉洲北角西北面  $308^{\circ}$  約 0.7 海里，海皇星沒有偏離航道。

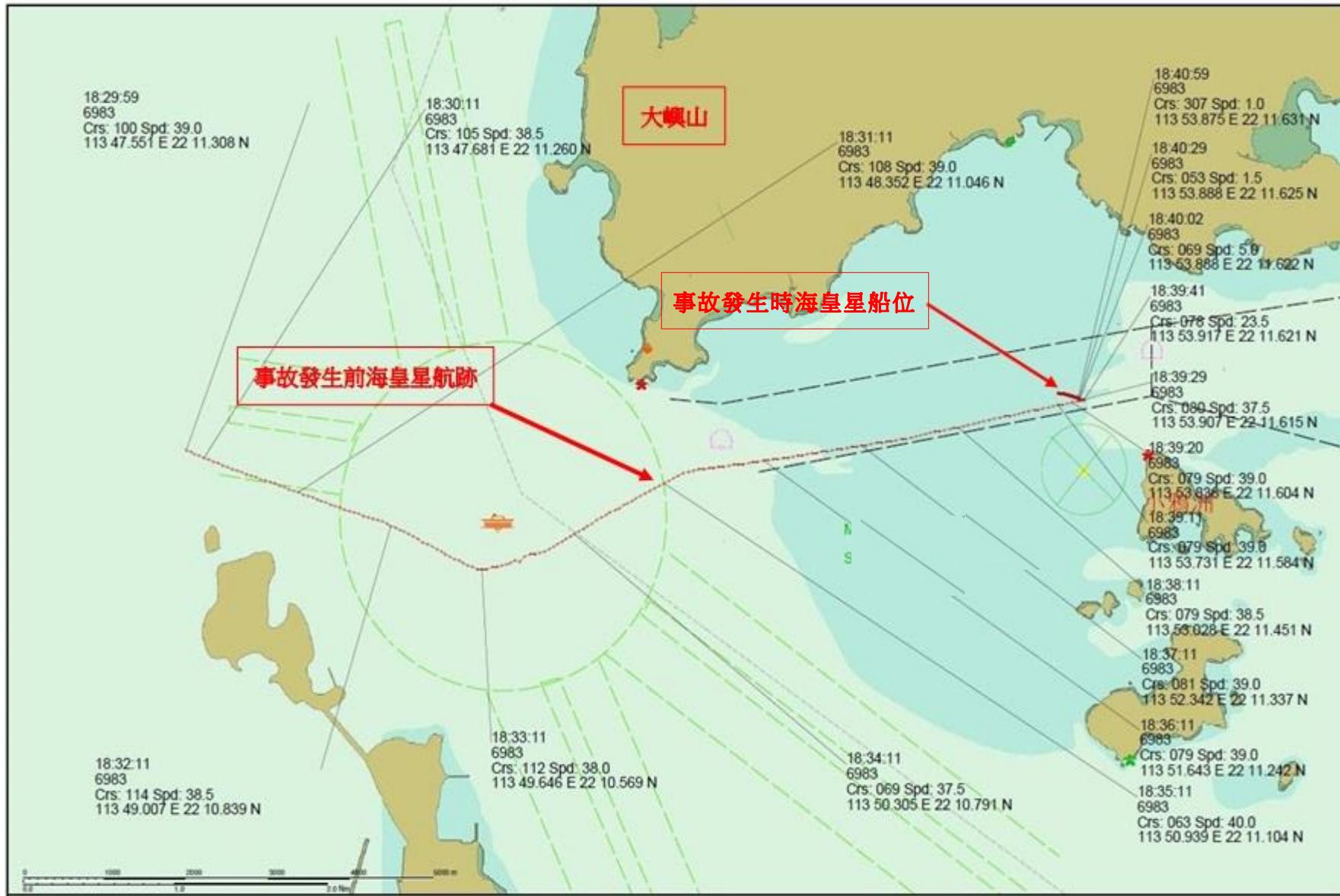


圖 6. 海事處船隻航行監察系統記錄的海皇星的航跡。



圖 7. 海事處船隻航行監察中心記錄海皇星在觸碰到不明物體時的雷達畫面。

- 5.10 事故發生所在水域，屬於分流角到北長洲的“推薦分道航行制”（recommended traffic separation scheme）的東西向航行分道，是往返香港與澳門的高速船的主要航道，每日有數百次，包括往返香港與內地的內河船使用該航道。事故發生前海事處沒有收到有關船舶與不明物體發生觸碰的事故報告，而船隻航行監察中心的雷達畫面顯示（圖 7），只有一艘西行船隻航行於海皇星左前方的西行航道中，並在事故發生時該船已經駛離海皇星，應與此事故無關。而事後檢查海皇星的船體側面，亦未有發現觸碰硬物的痕跡，因此可以判定海皇星駛過上述水域時，其船體沒有與水面大型物體發生過觸碰。
- 5.11 海皇星發生事故後，水警，消防處和海事處在附近海面進行了搜查，沒有發現可能造成此次事故的漂浮物體。海事處的海道測量船亦對事發位置附近水域進行了水下探測，也沒有發現可疑的水下物體。推斷船隻觸碰的不明物體，隨著水流或船隻航行引起的波浪作不規則的漂移，因此沒被尋獲。
- 5.12 同屬該管理公司的另一艘噴射高速客船“MADEIRA”（木星號）於 2013 年 11 月 29 日途經該“推薦分道航行制”水域時於周公島以南觸碰水下不明物體，意外導致 88 人受傷。經常航行於該水域的船員反映，該段水域不時出現大型漂浮物或垃圾。據海事處船隻航行監察中心（VTC）統計，2014 年 VTC 接到過 49 宗海面有礙航漂浮物的報告，而截止 2015 年 11 月底也有 48 宗相關報告。但事故前，VTC 並沒有接獲該段水域出現有大型漂浮物或垃圾等礙航物的報告。
- 5.13 從 2005 年 1 月份至這次事故發生時，香港註冊高速客船曾經於香港至澳門航線中不同的水域內發生過共 9 宗（包括是次意外）涉及触碰礙航物的海上事故，其中 6 宗為触碰水下不明物體。另外，此 9 宗事故中有 6 宗（即 67%）是於最近三年多的時間內發生，可見同類事故在近年有明顯上升的趨勢（詳情見下表）。

香港註冊水翼高速客船觸碰事故統計表 (2005.01.01 至 2015.10.31) :		
觸碰漂浮已知物體共 3 宗.		
事故日期	事發水域	人員傷亡
2012/02/17	香港	無
2014/11/01	澳門	無
2015/04/28	澳門	無
觸碰不明物體共 6 宗.		
2005/02/02	珠海	1 人受傷
2005/12/03	香港	6 人受傷
2007/10/29	澳門	無
2013/11/29	香港	88 人受傷
2014/10/07	香港	3 人受傷
2015/10/25	香港	126 人受傷

## 天氣狀況

5.14 事故發生時的天氣為良好，附近海面平靜，能見度超過 5 海里，吹東風 3 到 4 級。天氣狀況不是導致事故發生的因素。

## 海皇星的前後水翼及其支柱系統

5.15 海皇星是美國波音公司於 1979 年建造，屬於鋁合金單船體噴射水翼高速客船。船頭有前水翼及支柱形成 T 形組合（圖 8），船艉則有船艉左右兩段水翼及三根支柱。船隻在高速航行時，利用水翼在水中產生的承托力把船體升離水面以減少水和波浪施於船身的阻力，達致船隻高速和平穩舒適地航行的效果。前後水翼的艉邊沿的可調節翼板（Flap）通過液壓系統控制，以控制船隻升起的高度，航行的穩定性和操縱轉向。

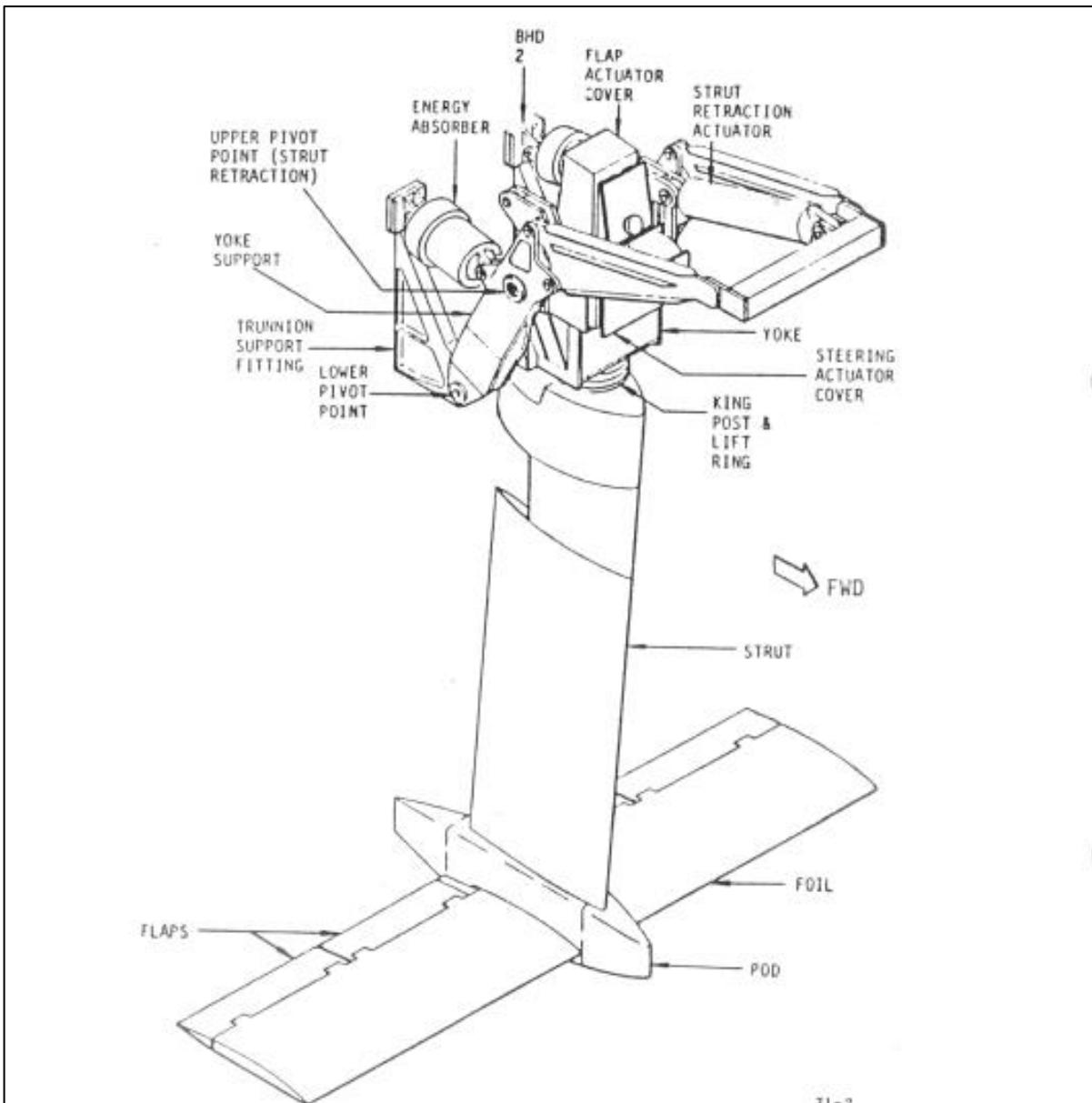
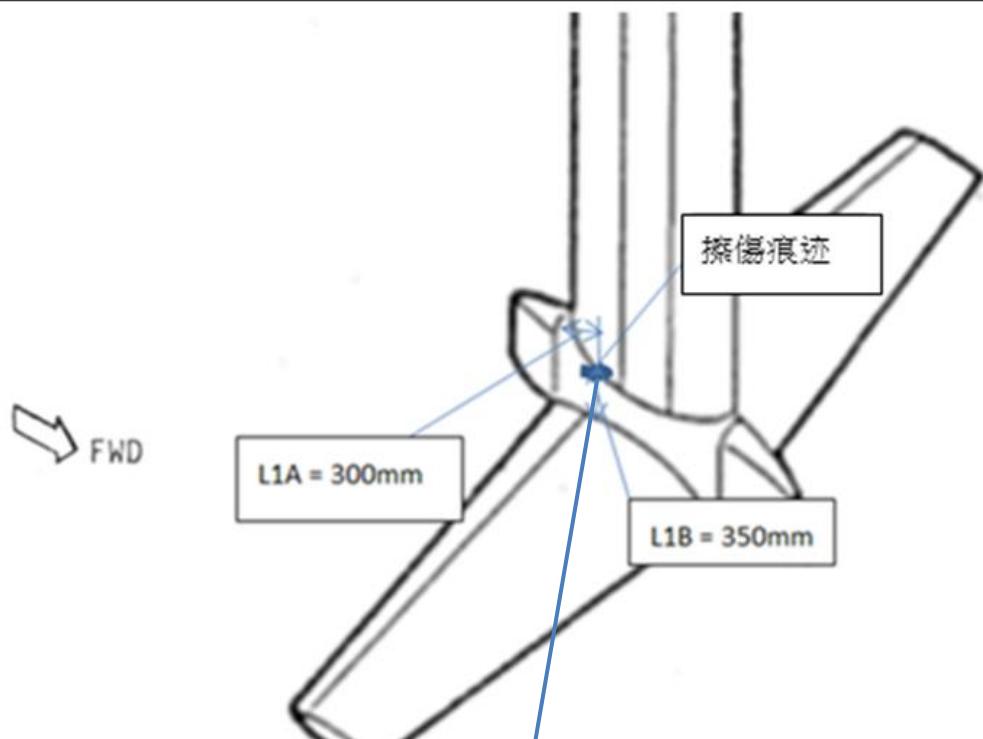


圖 8. 海皇星的前水翼及翼柱

5.16 前水翼支柱組成的主要構件由 KINGPOST，操縱警報器和翼板控制器組成。前水翼安裝在前支柱的底部，主要是在航行時給船頭提供支撐托力。前柱上有兩個能量吸收器（Energy Absorber），當前水翼前沿觸碰外物時，能量吸收器會吸收前柱及前翼遭受到的非正常大的衝擊力，減低損壞程度。於海皇星上配備的前水翼及其支柱和 KINGPOST，支柱同時作為舵可以用來操縱船舶的轉向。前水翼及其支柱在水下就位時通過插銷固定在船體上的一塊固定眼板上。本次事故後發現前水翼中柱根部的莢殼(POD)艉部右後側有輕微擦傷痕跡，但由於出現在艉部所以估計不是在這事故中所產生。（圖 9）



FORWARD STRUT AND FOIL ASSEMBLY



擦傷痕迹

圖 9. 海皇星的前水翼及翼柱的擦傷痕迹

- 5.17 後水翼由水翼和三根翼柱組成(圖 10)。艉部的中間支柱同時又是噴水推進裝置的入水口。艉部中間支柱有上部左右兩根剪力安全螺杆和下剪力安全插銷 (Shear Fuse Pin) 在後水翼放下到底部正確位置時把翼柱鎖定。下剪力安全插銷會在水翼遭受大力沖擊時斷開，以防止水翼經受非正常沖擊力造成對船體的損壞。
- 5.18 在本次事故發生後，發現後水翼有撞痕。後水翼因受到撞擊而導致後水翼中間支柱的下剪力安全插銷斷開，後水翼也因此發生了移位往後翹高(圖 11, 圖 12 和圖 13)。
- 5.19 由於上部左右兩根剪力安全螺杆相對下剪力安全插銷細小許多，任何巨大撞擊力主要由下剪力安全插銷來承受。
- 5.20 事故後，海事處委託香港理工大學機械工程學系對海皇星後水翼固定保險銷（即下剪力安全插銷）斷裂故障進行了實驗分析（詳情參見本報告附件一）。
- 5.21 該實驗分析報告顯示，下剪力安全插銷的斷開表面發現比較平直光滑並滿佈拋物線形而瘦長的酒窩狀波紋，這些波紋都是向  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$  的斜角方向所撕裂產生的，證明斷裂是由瞬間巨大的撞擊所引致。由於從後水翼所受的擦傷而計算出的撞擊力是遠超過下剪力安全插銷的承受力，所以可以確定下剪力安全插銷的斷開是由於船隻在高速行駛時後水翼撞到硬物所引致的。
- 5.22 由於後水翼的下剪力安全插銷已斷開，後水翼向後移位並翹高。最後，船隻失去升力而變成向水面插入。同時，移向後的水翼擋水造成阻力，而後水翼的移位同時造成位於艉中柱的吸水通道和船體底的吸水口分開，導致位於船體底部的吸水口吸到空氣，以致主機空轉超速停機 (Overspeed Shutdown) 使船隻失去推進力。主配電板的底座橫樑亦受船體向下插時的沖擊所影響而變形並引致主配電板保護斷路器跳閘，使船隻失去正常電力供應，而須靠應急電源供電。以上各種因素導致高速航行中的海皇星突然墮落水面及急停和短暫停電。
- 5.23 因應以約 39.5 節航速航行的海皇星觸碰到水下不明物體迅即墮落水面急停而產生的撞擊力，船艉左右底部因此破損進水，左右主機艙結構從船艉直到機艙前壁(肋骨號 22)變形及局部地方亦出現裂縫和斷裂，主機座受損變形，主機滑油系統損壞。

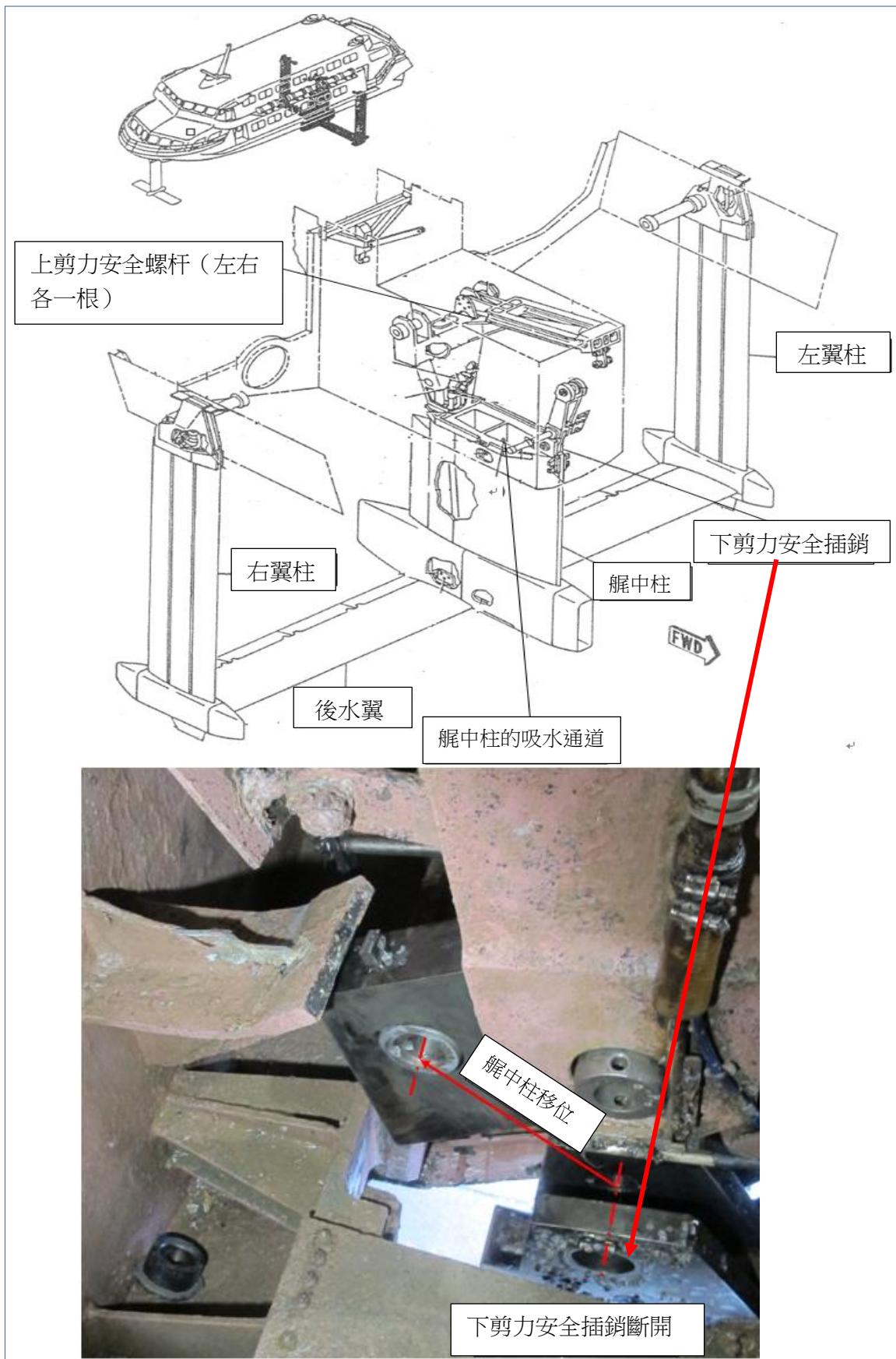


圖 10. 海皇星的後水翼及支柱

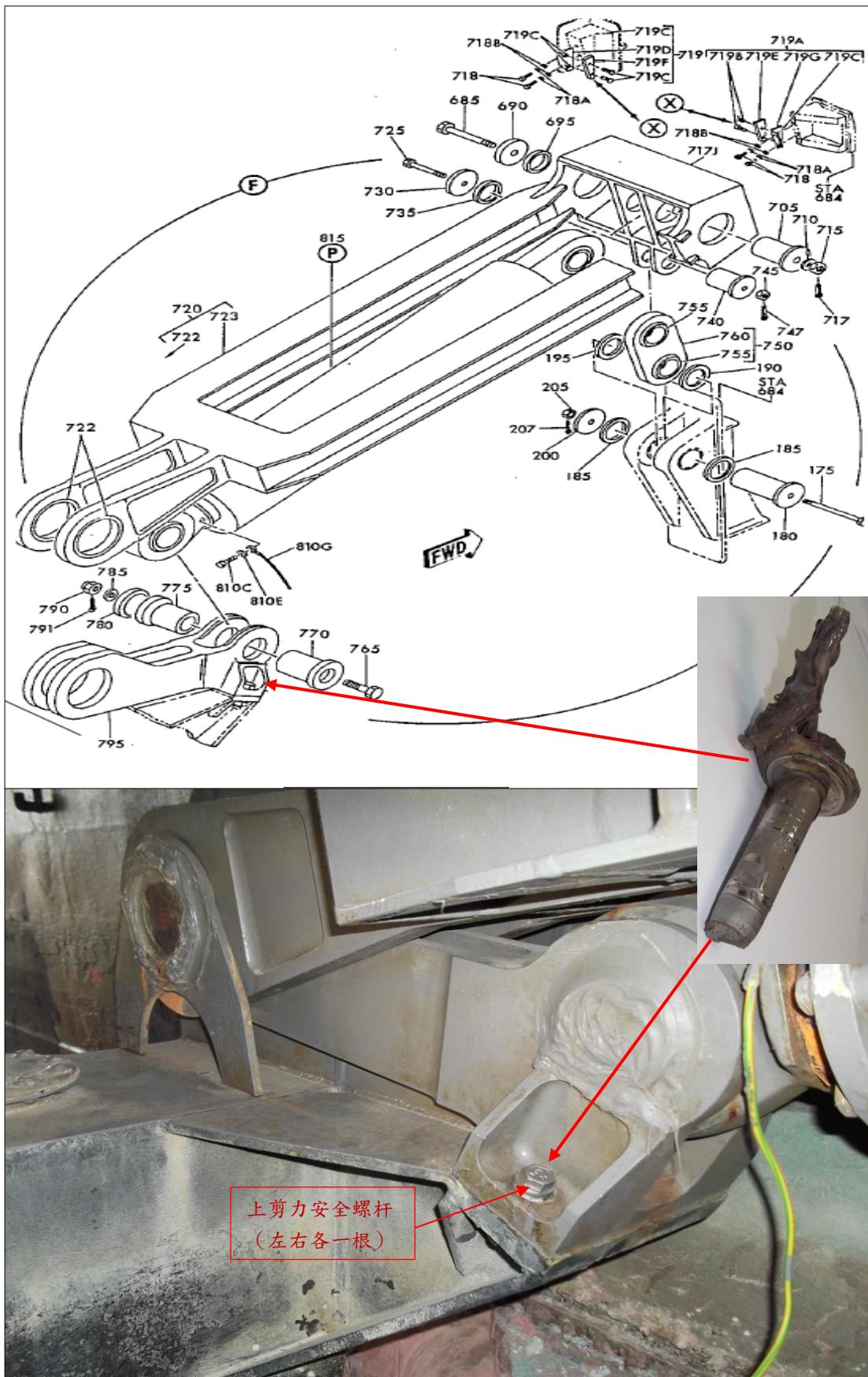


圖 11. 上剪力安全螺杆斷開

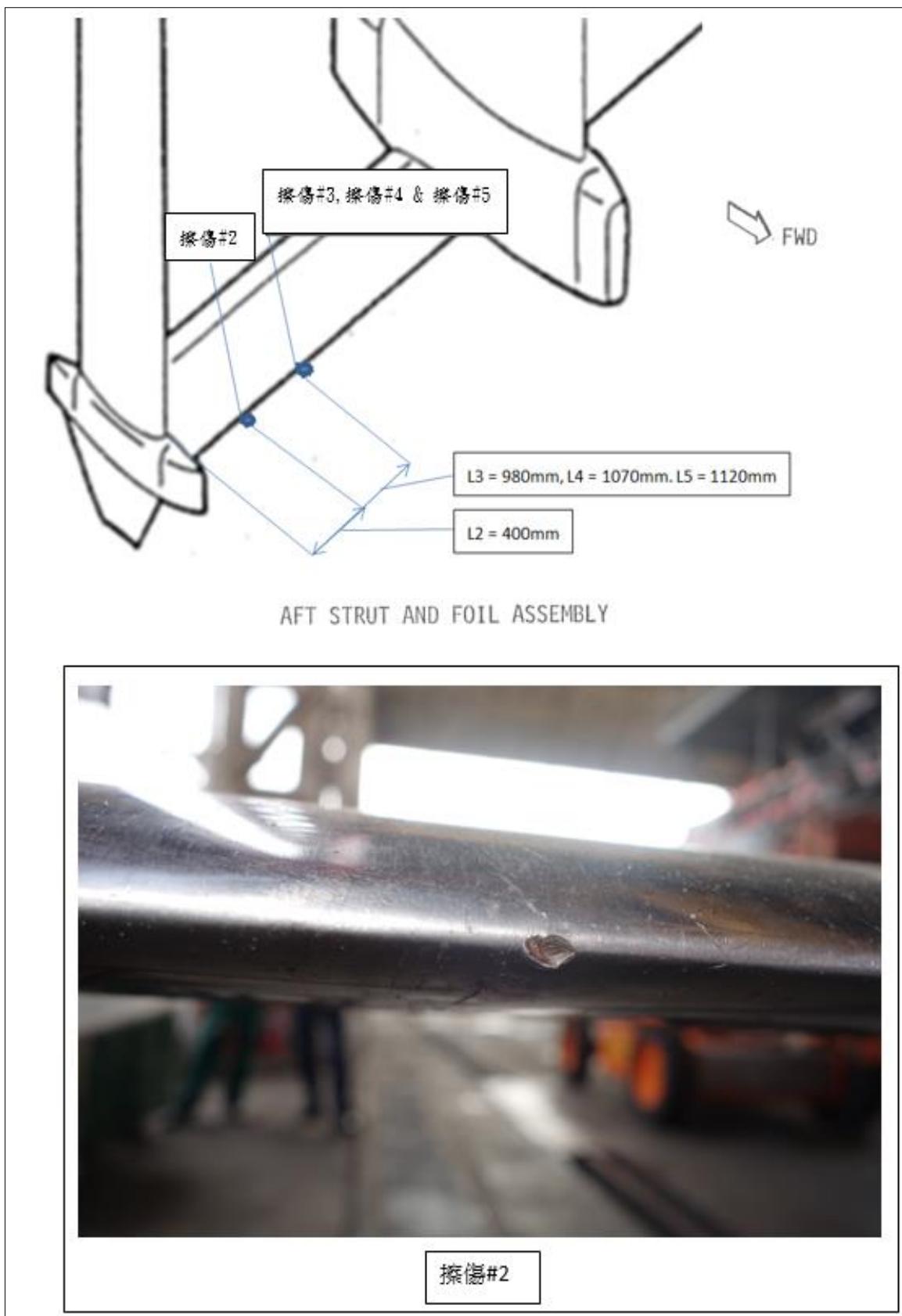


圖 12. 海皇星後水翼擦傷#2

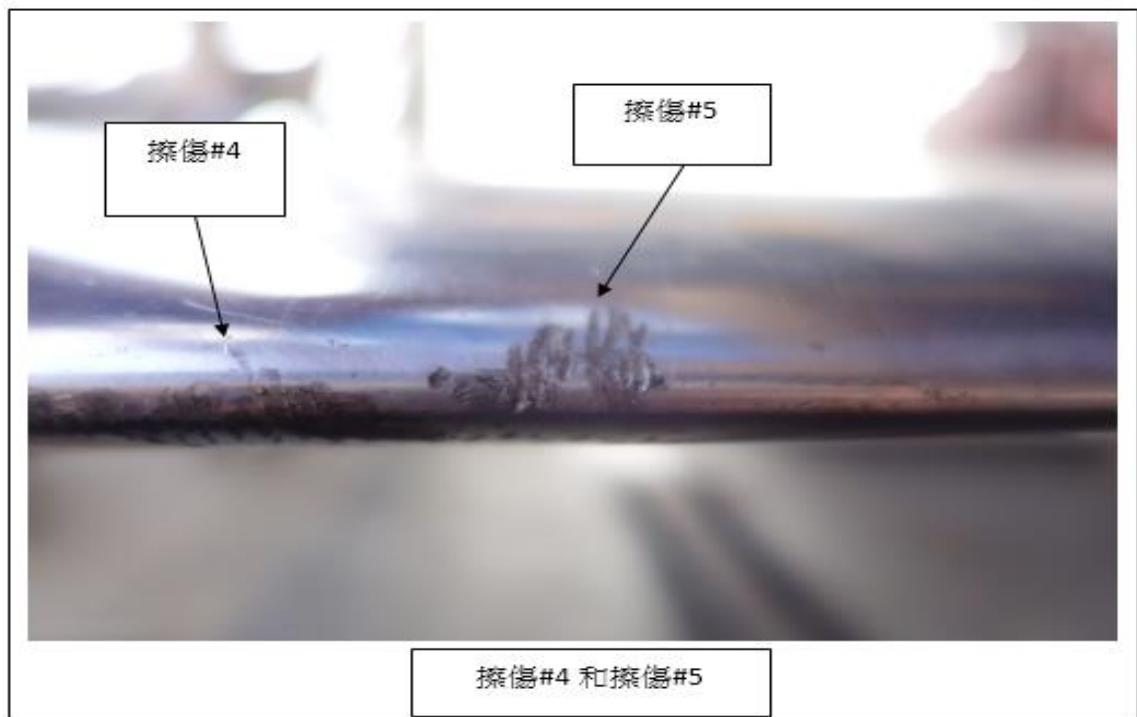
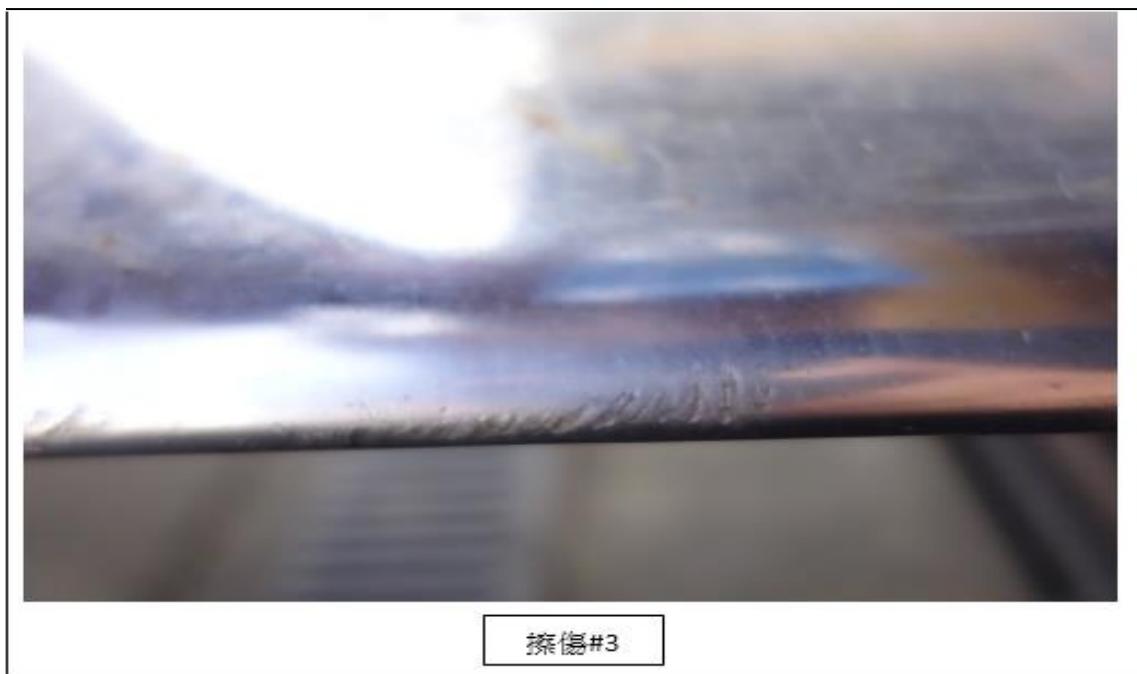


圖 13. 海皇星後水翼擦傷#3, #4 和 #5

#### 客艙乘客座椅，個人安全防護設備及其應用、人員受傷

5.24 海皇星主甲板客艙的座椅由挪威 Georg Eknes Industrier AS Eikangervag 公司製造，型式為 “Transit Super Nova 1410” 和 “Transit Super Nova 1420”，該型座椅由挪威船級社 (DNV) 檢驗認證並簽發了型式認可證書。上層甲板客艙的座椅由 Jepson Burns 公司

製造，型式為“Model No. 2000”，已獲得海事處認可。船上所有乘客座椅皆安裝了安全帶。

- 5.25 開航時，並在以水翼起飛前，船長都使用了船上的視像和聲音廣播系統播放安全注意事項，例如如何穿著救生衣，緊急逃生路線等，特別提示乘客繫好安全帶，不要隨意走動，並約每二十分鐘重複提醒一次。但是據艙務員及水手所述，雖經口頭勸喻，仍然很少有乘客在就座時會按要求妥當繫上安全帶。這也是最近幾年發生的類似事故造成多數乘客受傷的根本原因。
- 5.26 事發後的檢查發現，客艙座椅狀態完好，只有極少數椅背的小桌板支撑件斷裂，並沒有發現安全帶損壞(圖 14)。
- 5.27 部份乘客在意外發生的時候，被拋起並摔倒在地板上或猛烈地碰撞在前排座椅的椅背上或周邊的物體上，因而受傷。並有一些個人物件如嬰兒車，背囊飛出散落一地。



圖 14. 客艙座椅狀態完好

## 6. 結論

- 6.1 2015 年 10 月 25 日 1805 時，噴射水翼高速客船海皇星號（海皇星）離開澳門前往香港，船上載有乘客 163 名，船員 11 人。約於 1839 時，海皇星以翼航模式航行，沿著小鴉洲西北高速船航道東行分道內右側以  $078^{\circ}$  的航向和 39.5 節高速行駛，至“小鴉洲北”安全水域浮標以西水域 0.62 海里，海面一切正常，海皇星突然觸碰到水下不明物體，並導致主機自動停車，船體由翼航飛行狀態急速墮落水面，船速在十多秒鐘內由 39.5 節降到 14.5 節，巨大的慣性導致部分乘客和船員跌倒或被拋出其座位而受傷。
- 6.2 接到海皇星報告後，海事處、水警和消防處的船隻，加上政府飛行服務隊的直升機相繼到達現場救援，把傷者送往各醫院。於 2356 時已將全部乘客和傷者撤離海皇星。事故造成共 126 人受傷，其中 6 人傷勢嚴重。事故沒有造成油污染。
- 6.3 事故調查發現意外並導致大量人士受傷的主要肇事原因可能如下：
- 船隻在高速航行時，觸碰到水下不明物體導致後水翼的安全插銷斷開，後水翼向後擺而導致船隻失去升力並急速墮落水面停下和令船體損毀；
  - 船上人士沒依照船長指示在航行時繫上安全帶，導致他們被船隻急降時所產生的巨大慣性拋離座位受傷；及
  - 船上人士的行李及個人物件沒固定好，導致船上人士被散落物件撞傷。

## 7. 建 議

7.1 海皇星的管理公司、船長及船員應加強以下措施：

- 高速客船在航行時，應不時作出廣播，艙務員要經常提醒船上人士應留在座椅上並扣好安全帶，如非必要，不要隨意在船上走動；及
- 高速客船在開航前，乘客攜帶的大型行李應固定好，防止移動。

7.2 海事處應與業界商討，如何加強乘客乘搭高速客船的安全意識，在船隻航行時遵從船長的指示，扣好安全帶。

7.3 海事處應考慮須否制定措施，管制乘客在水翼高速客船於翼航期間應當留在座椅上並扣妥安全帶。

## **8. 送交文件**

- 8.1 凡意外調查報告中論及任何人或組織的行為操守，海事處的政策是把報告擬稿或其中某部分送交該人或組織細閱，讓其有機會對批評提出反駁，或提出調查人員先前未有掌握的證據。
- 8.2 報告擬稿已送交下列人士／單位，讓其提出意見：
  - ◆ 海皇星的船長及船東或管理公司；
  - ◆ 海事處客船安全組，船隻航行監察中心（VTC）和海港巡邏組（HPS）。
- 8.3 截至諮詢期屆滿，收到海皇星的管理公司，船隻航行監察中心（VTC）和海港巡邏組（HPS）的意見，報告作了適當修改。

# 附件一 《關於海皇星後水翼固定保險銷斷裂故障之分析報告》

香港理工大學機械工程學系

2015 年 12 月 8 日

(項目參考號：P15-0213)

## 1. 簡介

經香港海事處的要求，香港理工大學機械工程學系承擔了諮詢服務，調查噴射水翼高速客船海皇星於 2015 年 10 月 25 日所發生的意外事故的原因(圖 1)。用於固定後水翼的保險銷在操作位置斷裂是故障的根本原因(圖 2)。斷裂後的保險銷不能讓後水翼維持正常位置以舉起渡輪，導致事故和傷害。由於在現場調查中沒有發現撞擊物體，因此會透過化驗方法去調查故障是否是由意外撞擊所引致。根據香港特別行政區海事處所提供的證據顯示，事故可能由斷裂的保險銷 (圖 3)和後水翼的表面上的壓痕和劃痕引起(圖 4)。為了判斷壓痕和劃痕是否可以有顯著衝擊力破壞保險銷，保險銷的碎片及有壓痕的水翼金屬片已通過微硬度測試和化學成分分析。此外，保險銷的碎片進行了仔細的研究，用於識別裂紋的擴展。最後，透過理論分析以查證該水翼金屬片的損壞是否會導致保險銷的斷裂。

## 2. 調查方式

### 2.1 顯微硬度測試

TUKON1202 微硬度測試儀(Wilson®, Buehler)檢測水翼金屬片和保險銷(圖 5)。樣本由破碎的保險銷左方及右方和水翼提取，並用 400 至 1200 砂紙和 0.3  $\mu\text{m}$  的粒度氧化鋁懸浮液磨光。從磨光的樣本中取出 20 個數據點，並計算材料的硬度的平均值和標準偏差。

### 2.2 化學成分分析

樣本的化學成分透過安裝在 JEOL JSM-6490 掃描電子顯微鏡 (SEM) 的能量分散型 X 射線譜 (EDS) ( 圖 6 ) 化驗，並由 EDS 直接掃描。

### 2.3 斷口分析

採用日本電子 JSM-6490 SEM 為保險銷的斷裂面進行調查，碎片的左方和右方投入 SEM 並進行觀察。為了理解折斷力的方向，斷裂表面在 SEM 中對齊，確保 SEM 圖像是垂直對著船的方向。

### 2.4 劃痕測試

由於在水翼金屬片觀察到劃痕，相應的測試在一臺 BrukerUniversal Mechanical Tester ( UMT ) 進行(圖 7)。劃痕試驗是確定在水翼金屬片上留下劃痕所需要的力度。在測試中，法向力 (Fz 的) 由錐形鑽石尖端施加，逐漸增大到集力 (10N)，同時樣本是水平移動。其間，切向力 (Fx 的) 是記錄下來。摩擦係數的計算公式為這兩個力 Fx/ Fz 的比值。

## 3. 實驗結果

### 3.1 顯微硬度測試結果

樣本從水翼、保險銷碎片的左方和右方取出，該些部位皆遠離損毀區域。在硬度試驗中，負荷施加是 1 千克，保持時間為 15 秒。從光滑表面的不同位置收集了二十個數據點，其平均硬度的結果載於圖 8。

棱錐形的 Vicker Indenter 離開菱形的痕跡可使用顯微鏡來測量其面積。維氏(Vicker) 硬度數目以單位 HV 表示所需要的力，在千克力的單元，以產生 1 平方毫米凹坑標記。對於金屬鋼，平均硬度為 302 HV，表明壓力需要引起壓痕標記是  $302 \times 9.8 = 2960 \text{ MPa}$ ，此值除以 3 是材料變形的力度。根據 Tabor's rule，即  $987 \text{ MPa}$ ，這與變形所需的力量一致，即 15-5 沉澱硬化 (PH) 不鏽鋼。

根據客戶提供顯示，保險銷由純鈦製造。破碎的保險銷左方及右方硬度明顯不同。左方平均硬度為 230 高壓，8 高壓標準偏差。右方平均值為 178 高壓，7 HV 標準偏差。使用較低的值 178 HV，保險銷的變形應力大約  $581 \text{ MPa}$  ( $178 \times 9.8 / 3 = 581$ )。使用更高的價值 230 HV，變形應力約  $751 \text{ MPa}$  ( $230 \times 9.8 / 3 = 751$ )。折斷保險銷所需要的總切力為：

$$(581 + 751) / \sqrt{3} \times \pi \left( (25.4 \times 3)^2 - (25.4 \times 2.14)^2 \right) / 4 = 1.72 \times 10^6 \text{ N}$$

基於 von Mises 標準，其中變形應力為 581 和  $751 \text{ MPa}$  除  $\sqrt{3}$ 。保險銷的附圖載於圖 9。在保險銷的測試報告中，發現所需要的切力為  $1.65 \times 10^6 \text{ N}$ 。根據我們的計算，保險銷符合要求。

### 3.2 化學成分分析結果

為三種樣本進行 EDS 分析後，水翼金屬片物料是 15-5 不鏽鋼，並有鉻和鎳的含量(圖 10)。雖然鉻和鎳的實際內容和名義值的不同，但基於實際的冶煉，變化是合理的。保險銷的物料也被認為是純鈦(圖 11)。

### 3.3 斷裂面分析結果

透過 SEM 觀察，保險銷的斷裂面表明韌性切破壞和切力的方向。圖 12 表示保險銷左側的斷裂面，有細長拋物面凹坑。圖 12a 顯示的頂部區域，斷裂面類似保險銷的側面，指示服務器縮頸在邊界和折疊在側表面附近的區域。凹陷的原因，如圖 12b~d，是由於幾次切斷和擴大(圖 12f)。這些拋物線凹坑的長軸的方向上應說明的切力，估計為約 20 度~30 度，繞垂直軸線(圖 12b 和 c)。圖 12e 示出了裂縫，其中裂縫破壞速度非常快。

### 3.4 劃痕測試結果

劃痕測試的結果示於圖 14 (a~c)。進行了三次測試並載有數據。劃痕的顯微圖像附有各個數據點的插圖。這些實驗都顯示出，摩擦係數或切向力和法向力之間的比率係數為 1，此外在 10N 力度下的劃痕寬度大約是  $137 \pm 9 \mu\text{m}$ 。在劃痕試驗中得知，法向力與劃痕的寬度不成正比，但它的平方，由於硬度，這可以看作是每單位面積的法向力是一個常數。在劃痕試驗的結果中亦可看出，不同的法向力與相應的劃痕寬度。例如，在圖 14 (a) 所示，當劃痕的寬度大約  $51.73 \mu\text{m}$  和  $136.72 \mu\text{m}$ ，法向力約為 1.5 和 10 N。然後，可發現， $(51.73/136.72)^2 = 0.143 \equiv 1.5/10$ 。

## 4. 分析和結論

圖 15 表示後水翼的支柱圖。以對時刻鉸接 A 和假設平衡，以下式成立：

$$P \sin \alpha \cdot l - F_L l_1 + (P \cos \alpha + F_D) H_1 + F \sin \theta \cdot (H_1 - H_2) - F \cos \theta \cdot D = 0$$

當中  $l$  和  $l_1$  分別是從水翼的前緣和從水翼的氣動中心點的水平距離到鉸鏈 A， $H_1$ ， $H_2$  和 D 所示圖 2， $F_L$  和  $F_D$  是誘導水翼片的總升力和曳力， $P$  為衝擊力，而  $F$  是由保險銷到保持板所施加的力。在圖 15 中的  $\alpha$  和  $\theta$ ，分別為衝擊力的方向和由保險銷施加的力角。首先，我們考慮在正常操作

情況下（沒有衝擊力， $P=0$ ），Eq(1) 降低到：

$$-F_L l_1 + F_D H_1 + F_0 \sin \theta_0 \cdot (H_1 - H_2) - F_0 \cos \theta_0 \cdot D = 0$$

其中，下標“0”的力  $F$  和角度  $\theta$  指示的正常場景操作。這是合理的推測這種力的保險銷施加應最小化在正常情況下，使得能力承受翼板系統的影響已被最大化。因此，讓我們假設  $F_0=0$  和 Eq(2) 變為：

$$-F_L l_1 + F_D H_1 = 0,$$

將 Eq(3) 代入 Eq(1)：

$$P \sin \alpha \cdot l + P \cos \alpha \cdot H_1 + F \sin \theta \cdot (H_1 - H_2) - F \cos \theta \cdot D = 0$$

$P$  力度大約為：

$$P = F \frac{D \cos \theta - (H_1 - H_2) \sin \theta}{l \sin \alpha + H_1 \cos \alpha}$$

表 1 列出由客戶提供 Eq(5) 的尺寸，發現  $F = 1.72 \times 10^6 \text{ N}$  力度導致破壞保險銷。劃痕測試中，正常縮排和劃痕力幾乎是相同的 ( $\text{COF} \approx 1$ )，為  $\alpha = 45^\circ$ 。考慮到一些沒有引起劃痕的情況下，應考慮  $\alpha < 45^\circ$  的情形。衝擊力  $P$  與角度  $\theta$  的關係繪製在圖 16。計算結果顯示衝當擊力大於 300kN，是可能使保險銷斷裂。另一方面，衝擊力可以從凹坑標記和在水翼金屬片劃痕進行估計(圖 4)。

Table 1: Dimensions in Eq. (5)

$H_1$	$H_2$	$D$	$l$
4.936 m	3.462 m	1.841 m	0.687 m

圖 4 (a) 表示一個嚴重壓痕的標誌。該標記的寬度是 6 毫米和高度約為 4 毫米。該標記是橢圓形具有約  $\pi \times 6 \times 4 / 4 = 18.84 \text{ mm}^2$  的區域。按水翼金屬片材料的硬度，這是 2960MPa 所計算(第 3.1 節)，該所需要正常的力約為：

$$2960 \text{ MPa} \times 18.84 \text{ mm}^2 = 56 \text{ kN}$$

圖 4 (b) 表示出一個寬度至少為 20 毫米和幾個劃痕的寬度約為 1~3 毫米。我們的觀察是，有三個 1 毫米的劃痕，1 個 2 毫米劃痕，一個 3 毫米劃痕。該正常力度：

$$\left\{ \left( \frac{20}{0.137} \right)^2 + 3 \left( \frac{1}{0.137} \right)^2 + \left( \frac{2}{0.137} \right)^2 + \left( \frac{3}{0.137} \right)^2 \right\} \times 10 = 222 \text{ kN}$$

圖 4 (c) 示出了兩個寬劃痕。它們的寬度都為約 6 毫米，並基於所述刮擦試驗以估計法向力。需要注意的是 10N 的法向力可以留下  $137 \mu\text{m}$  ( $0.137 \text{ mm}$ ) 的寬度劃痕，並且法向力成比例地留下劃痕或壓痕標記寬度的平方，因此這兩個 6 毫米劃痕產生的正常衝擊力：

$$(6/0.137)^2 \times 10 \times 2 = 40 \text{ kN.}$$

注意圖 4 (c) 中所示的損傷。這可以是由深的壓痕和劃痕同時造成的。如果是這樣，法向力可能更大。

圖 4 (d) 示出一個大的寬度約 10 毫米，約 25 窄小劃痕，約 1 毫米的寬度。該法向力產生的正常衝擊力：

$$\left\{ \left( \frac{10}{0.137} \right)^2 + 25 \times \left( \frac{1}{0.137} \right)^2 \right\} \times 10 = 67 \text{kN}$$

圖 4 (e) 示出了一些壓痕/劃痕。他們重疊在 30 毫米寬。它們的高度為約 2 毫米。因此，如果他們被視為一個單一的縮排，即  $30 \times 2 = 60 \text{ mm}^2$ ，法向力為：

$$2960 \text{ MPa} \times 60 \text{ mm}^2 = 178 \text{ kN}$$

如果它們被視為寬度 30mm 的單一劃痕，法向力是  $(30 / 0.137)^2 \times 10 = 480 \text{ kN}$ ，這可能被高估。

從劃痕估計總法向力比約  $56 + 40 + 222 + 178 = 496 \text{ kN}$ 。這遠遠超出了用公式 (5) 計算的最小衝擊力(圖 16)。應當注意，上述估計的衝擊力，由於硬度的材料比金屬鋼高，如岩石或混凝土，而切向力的劃痕沒有被包括在內。實際影響力必比計算大。考慮到這些因素，結論是保險銷的斷裂或海皇星的事故是由於右側水翼受到衝擊。

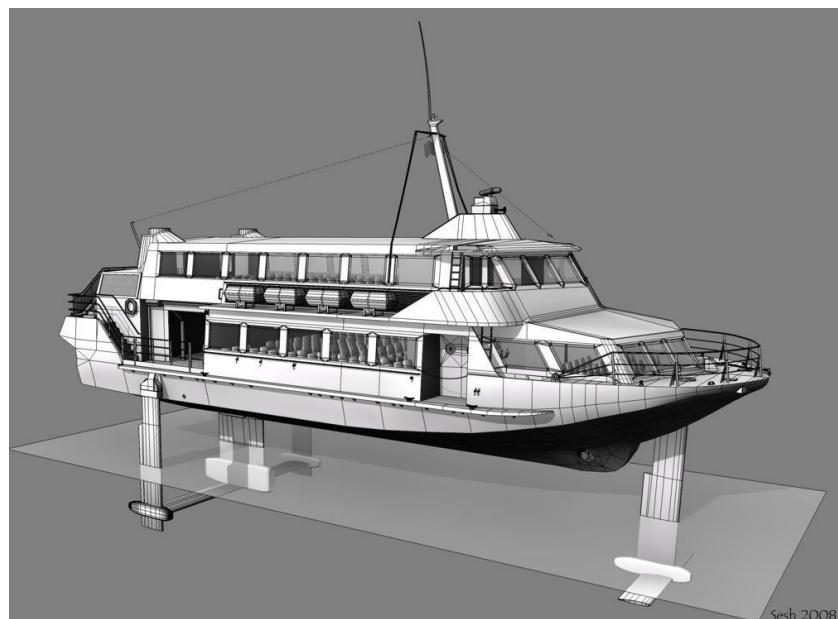


圖 1：噴射船海皇星，後水翼的位置草圖

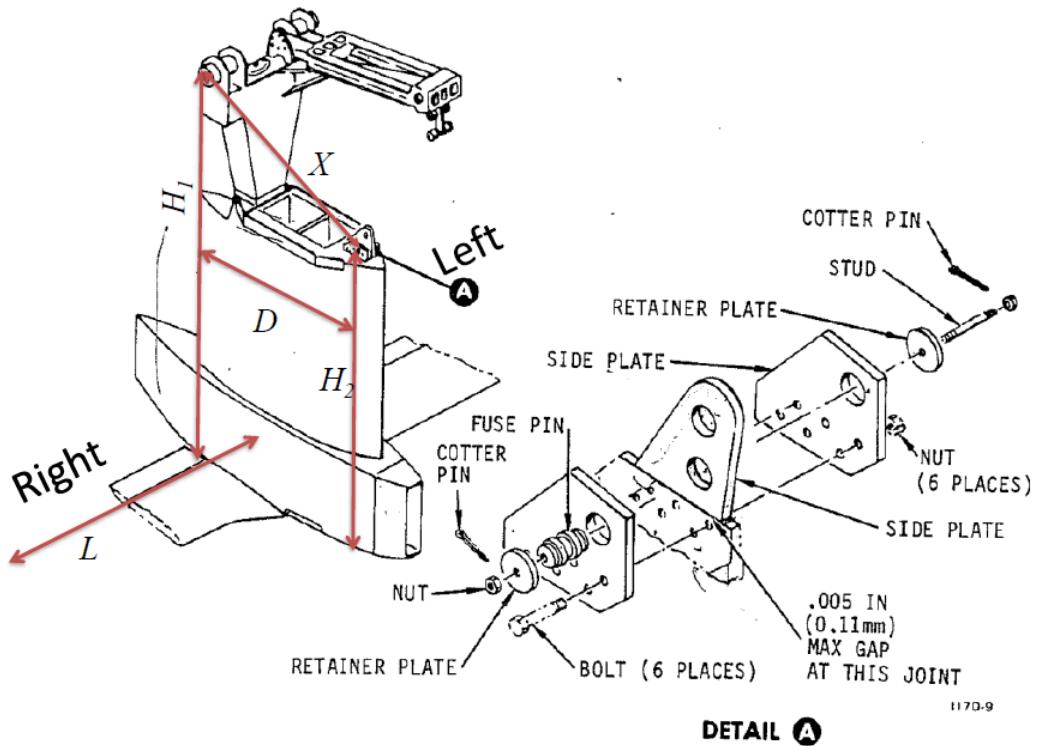


圖 2：後水翼系統，保險銷的位置。在圖中所示的尺寸  $H_1$ ， $H_2$ ， $D$ ， $X$  和  $L$  是從鉸鏈銷的中心到水翼的前緣垂直距離，從保險銷的中心到水翼的前緣垂直距離，鉸鏈的中心和保險銷的中心之間的水平距離，鉸鏈的中心和保險銷之間的距離，和從海皇星的中心線到最遠的壓痕標記之間的距離。



圖 3：破碎的保險銷

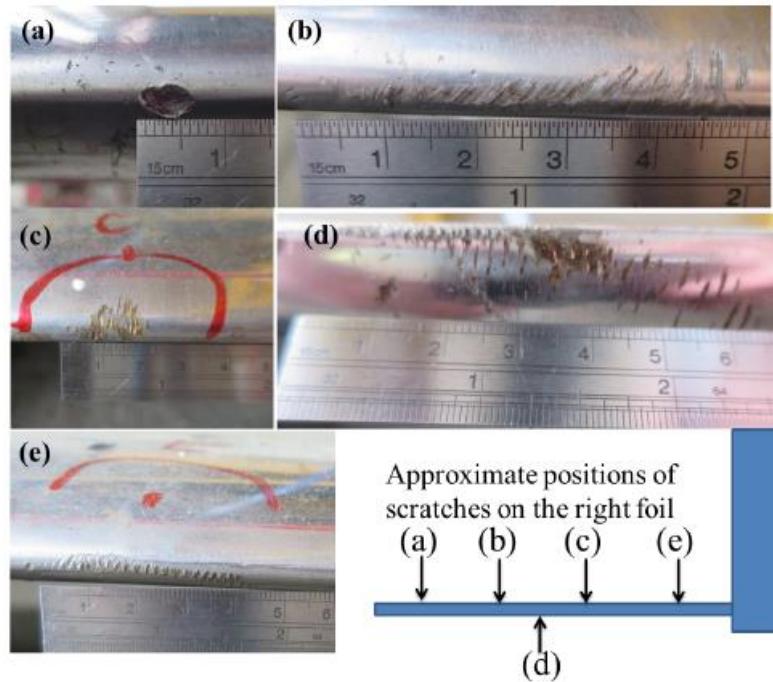


圖 4：水翼金屬片右側壓痕和劃痕

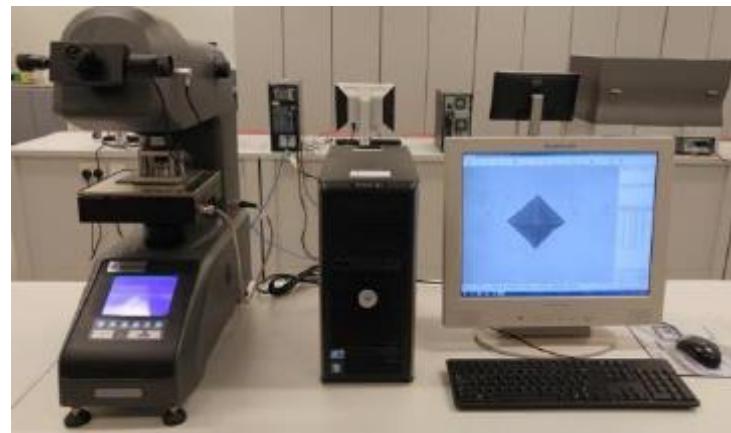


圖 5：Tukon 1202 Micro-hardness Tester, Wilson®, Buehler



圖 6：安裝了 JEOL JSM-6490 SEM installed 的 EDS

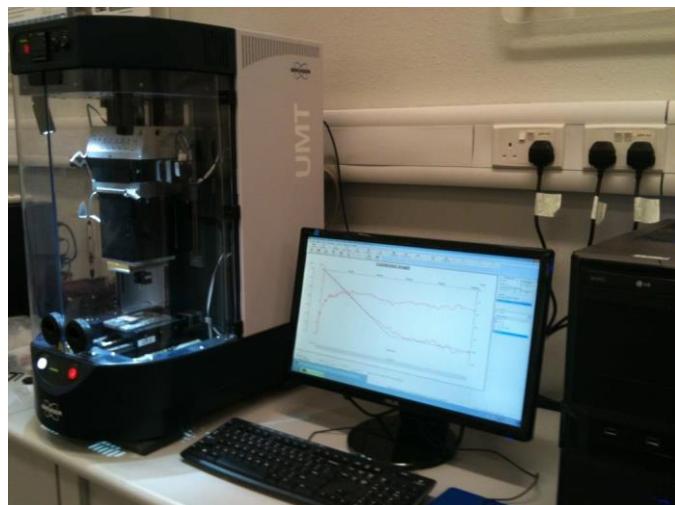


圖 7：Bruker Universal Mechanical Tester (UMT) 用作劃痕測試

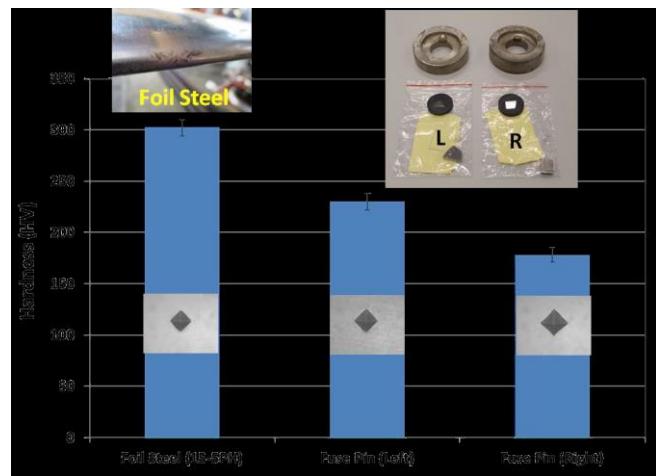


圖 8：水翼金屬片的 Vickers hardness 及保險銷碎片

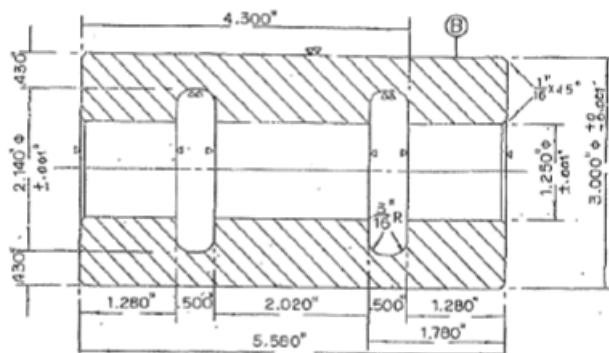


圖 9：保險銷尺寸

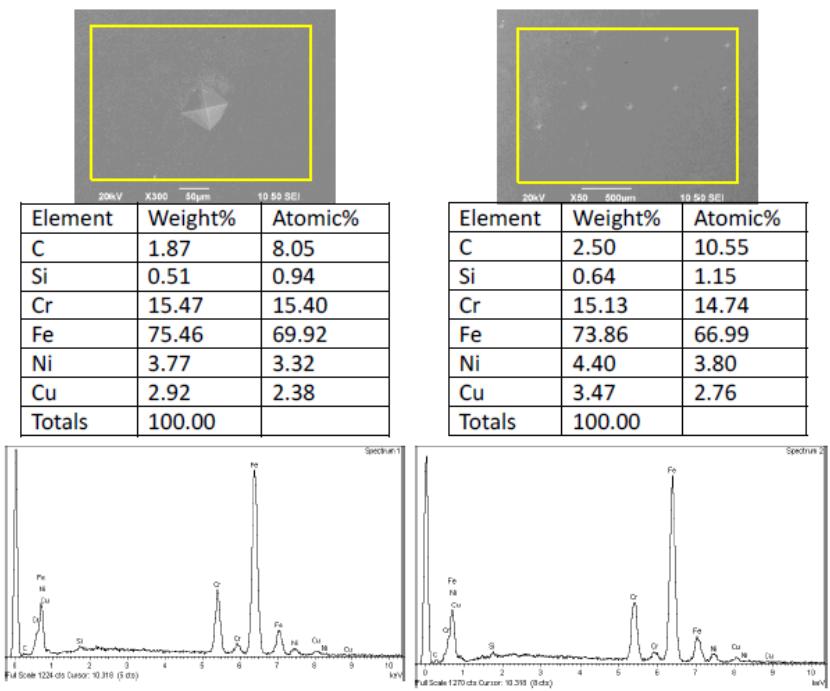


圖 10: 15-5PH 水翼金屬片的分析結果

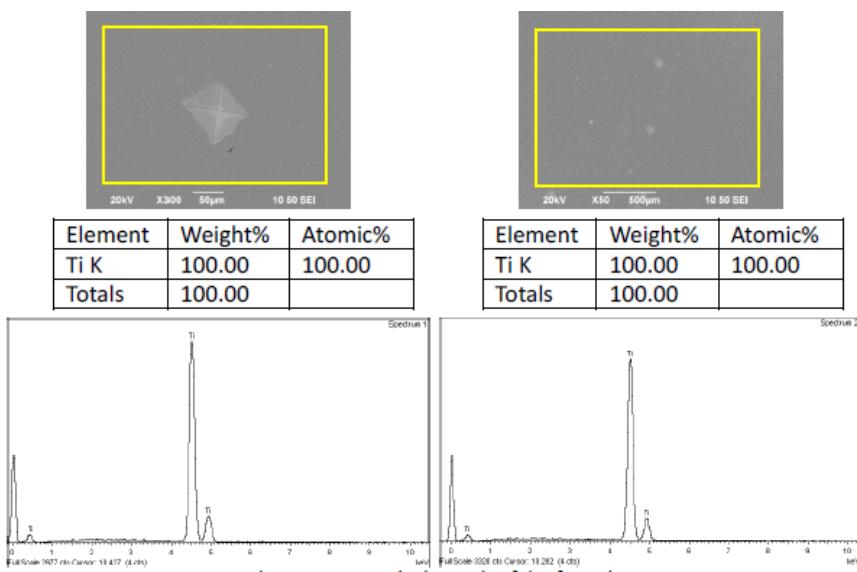


圖 11: 保險銷的 EDS 分析結果

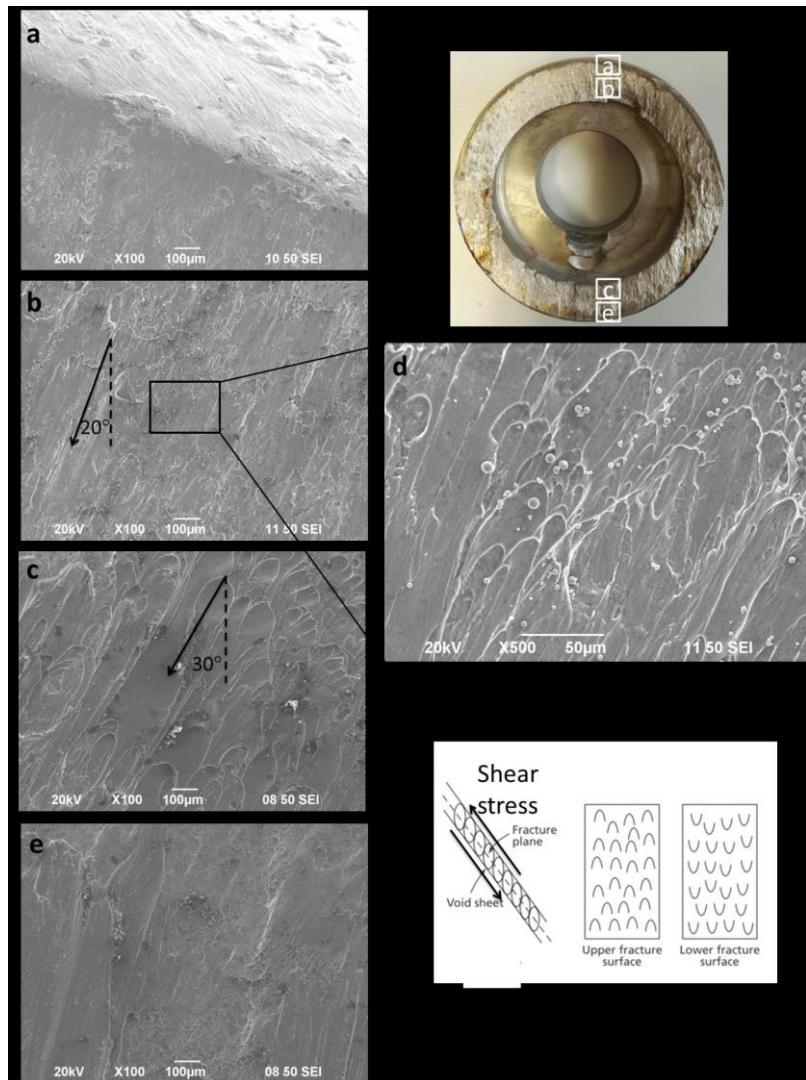


圖 12: 保險銷左側的斷口

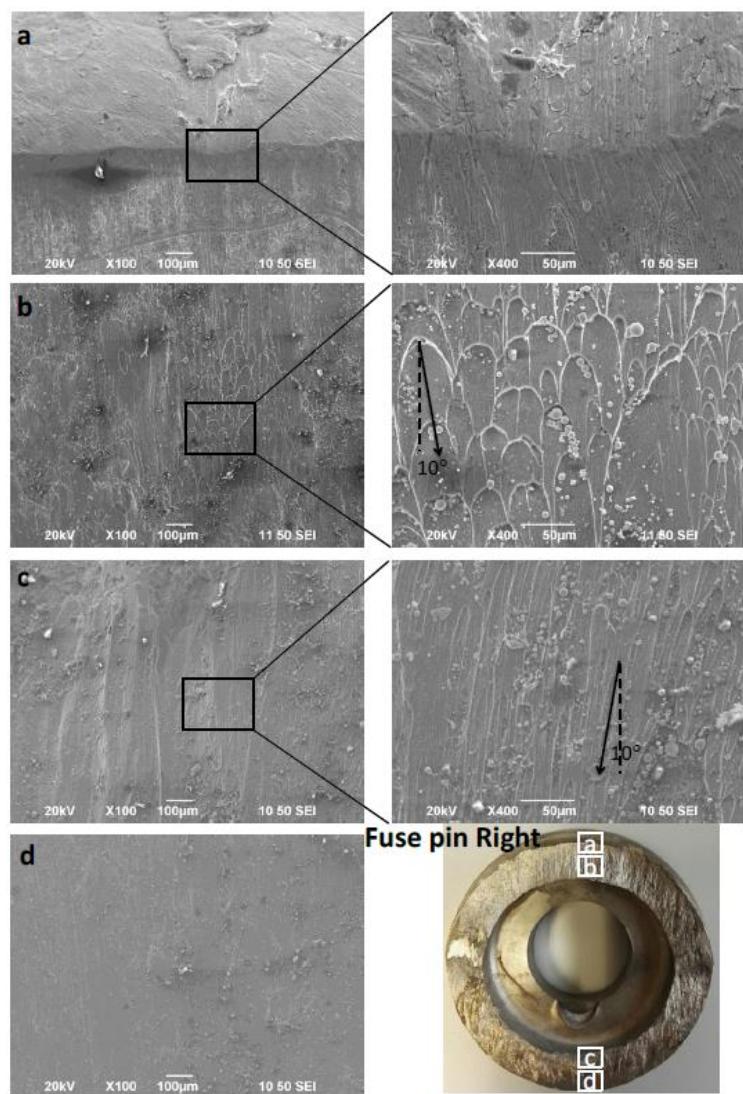
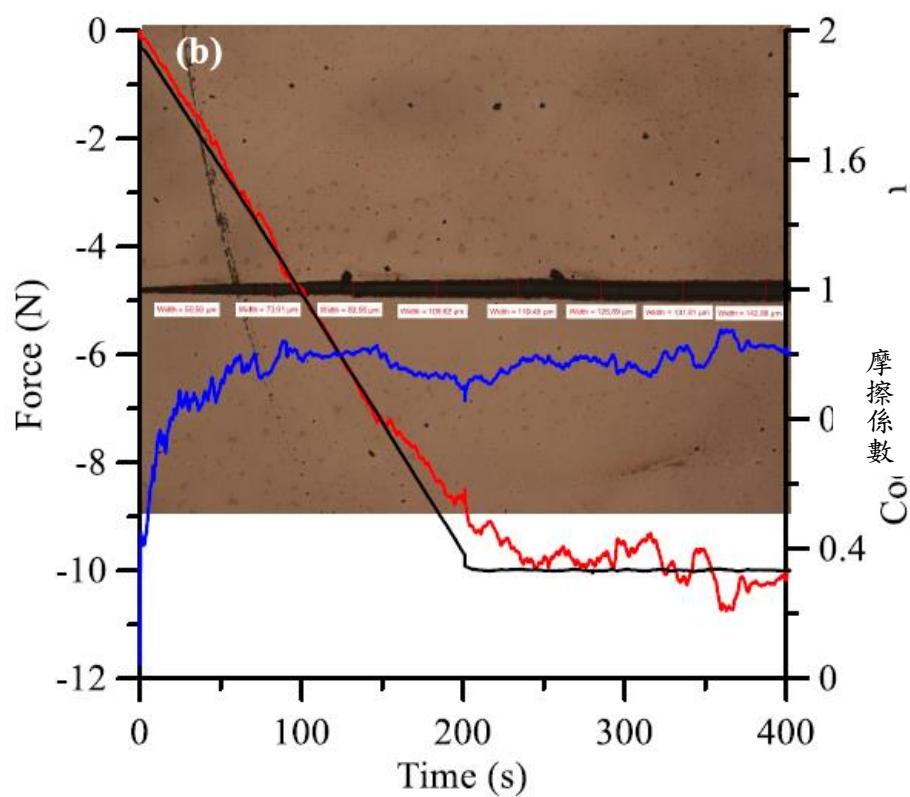
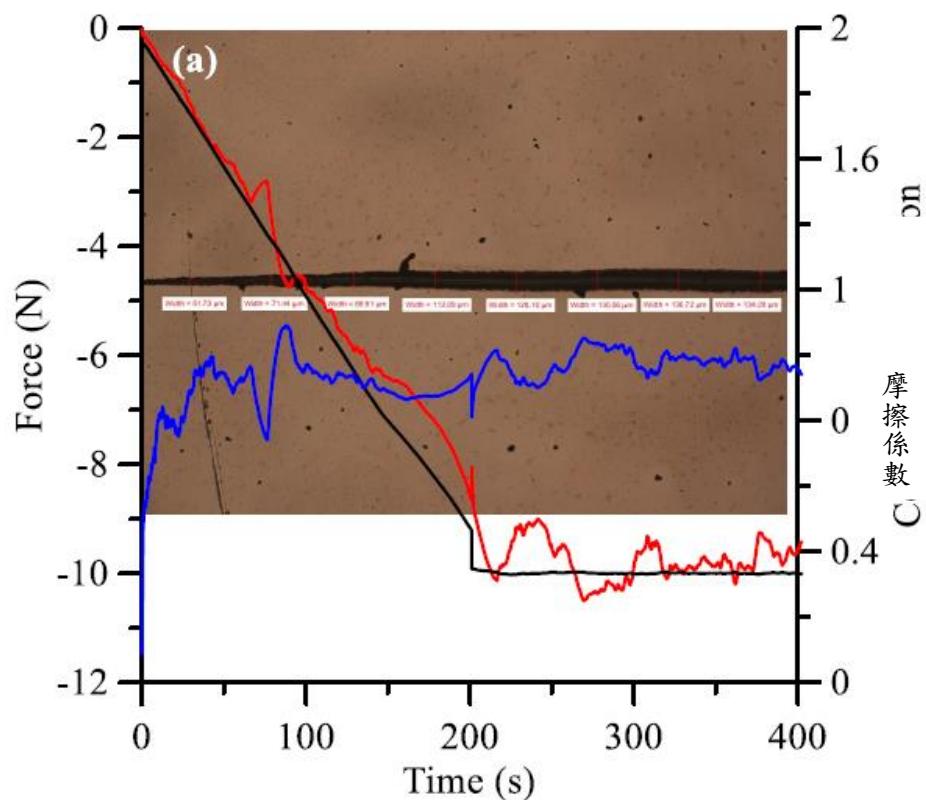


圖 13:保險銷右邊的斷口



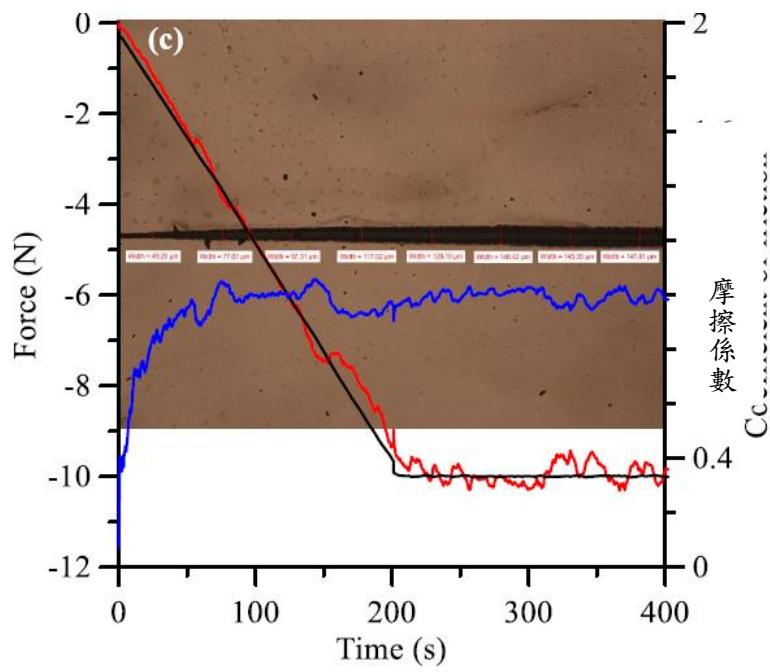


圖 14: 劃痕試驗的結果：(a~c) 三個獨立實驗的結果，其中顯示出摩擦係數或切向力和法向力之間的比率大概為 1, 此外在 10N 力度下的劃痕寬度大約是  $137 \pm 9 \mu\text{m}$ 。

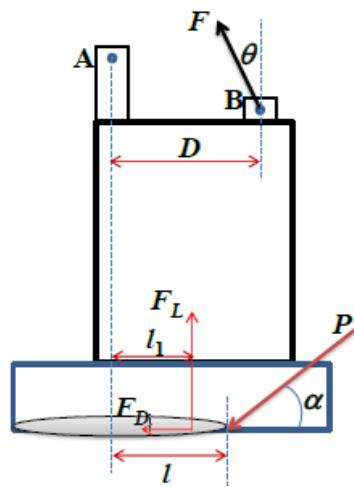


圖 15:用於支撐後水翼的支柱的自由體圖

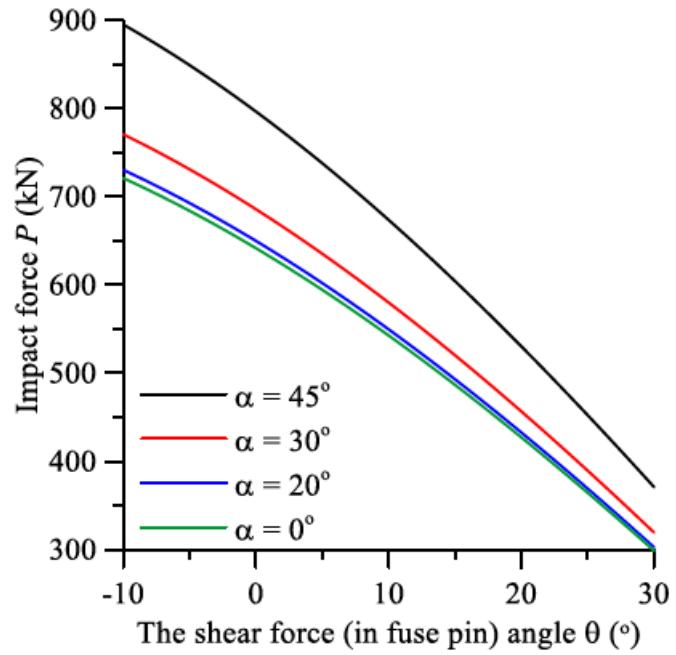


圖 16: 衝擊力  $P$  對剪切力角度  $\theta$