



香港天文台

HONG KONG OBSERVATORY

Reprint 529

颱風伊布都(0307)襲港時引起的強烈湍流

莫正華，陳世倜

第十八屆粵港澳氣象科技研討會，

中國，香港，2004年2月16-18日

颱風伊布都 (0307) 襲港時引起的強烈湍流  
莫正華 陳世倜  
香港天文台

摘要

颱風伊布都 (0307) 在 2003 年 7 月 24 日襲港期間，一共有 31 班航機報告在香港國際機場遇上湍流，其中 15 個為強烈湍流報告。這是香港國際機場自 1998 年啟用以來，航機報告遇上強烈湍流最多的一天。

本文探討了引起這次強烈湍流的各項有關氣象觀測，特別是機場附近的風速及風向、機場多普勒天氣雷達及激光雷達系統探測到的徑向風速和當天飛機在航行時所記錄得的風速風向及加速率數據。透過這個個案研究，我們可更清楚瞭解現時機場的氣象設施分辨湍流的能力，希望能為改善湍流預報提供參考數據。

**Severe Turbulence during the passage of T. Imbudo (0307)**  
**C.W. Mok and S.T. Chan**  
**Hong Kong Observatory**

**Abstract**

A total of 31 aircraft reported encountering turbulence at Hong Kong International Airport (HKIA) during the passage of T. Imbudo (0307) on 24 July 2003. Of these, 15 were severe turbulence reports. It is a single day with the largest number of cases of severe turbulence reported by aircraft since the opening of HKIA in 1998.

This paper examines the various meteorological observations recorded during the episode, in particular the wind speed and wind direction in the vicinity of HKIA, radial velocities detected by LIDAR and TDWR and the wind and accelerometer readings recorded by aircraft on that day. Through this case study, we can better understand the capability of existing airport meteorological facilities in depicting turbulence, thereby providing a reference data set for enhancement of turbulence forecasting.

## 1. 引言

位於赤鱗角的香港國際機場受附近群山環抱，在某些天氣情況如熱帶氣旋影響下，氣流受到山脈阻擋，在下風的地方不時會出現風切變及湍流，影響航班升降。從機場多普勒天氣雷達的觀測資料歸納出在熱帶氣旋影響下機場附近出現的風切變和湍流，其主要產生機制為在強偏南氣流吹越大嶼山後在機場附近產生狹長的高及低速氣流、渦旋和穿越山峽的下沉高速氣流(文獻[1]及[2])。

颱風伊布都(0307)在2003年7月24日襲港期間，一共有31班航機報告在機場遇上湍流(見表一)，其中15個為中度至強烈或強烈湍流報告(註：本文以後簡稱此類報告為強烈湍流報告)。這是香港國際機場自1998年啟用以來，航機報告遇上強烈湍流最多的一天。在同日亦有66班航機報告遇到顯著風切變，即逆風(headwind)轉變達到或超過15海里/小時，其中14班同時報告遇到湍流。

這次湍流的主要成因亦是由強風吹越山脈所引起的。本文分析了各項有關氣象觀測，包括機場附近多個氣象站的風速及風向(見第三節)，多普勒天氣雷達及激光雷達系統的數據(見第四及五節)及當天航機的飛機數據(見第六及七節)。在第八節我們對現時的風切變及湍流警告系統在這個案中的預警能力進行探討，為日後發展更完善的湍流警告預警提供參考。

## 2. 背景

伊布都於2003年7月17日在關島西南約730公里處發展為熱帶低氣壓，向西北偏西移動。伊布都於7月20日清晨發展成為颱風，並於7月22日晚上進入南海，趨向華南海岸。7月24日早上伊布都在廣東西部陽江附近登陸。圖一為伊布都的路徑圖。

隨著伊布都移近華南沿岸，本港風力逐漸增強。伊布都在7月24日上午5時左右最接近香港，本港吹強風至烈風程度東南風。從沙螺灣的氣流剖析儀(位置見圖二)所記錄得的風速風向(圖三)，可見當日由低層至1500米以下起初是東風，隨著伊布都在香港西南面掠過，風向亦由東漸轉為東南。由於當天吹盛行東至東南風，遇上湍流的抵港

航機都是從西面於北跑道降落的，而離港的都是利用南跑道向東起飛的。當日赤蠟角大部分時間處於伊布都的螺旋雨帶之間的空隙中，因此機場整日只錄得 4.2 毫米雨量。

### 3. 風速及風向分析

自 7 月 23 日晚上至 24 日本港的盛行風速及風向，可參考在大嶼山東南的長洲氣象站當日的記錄（圖四）。

在大嶼山上的大風坳氣象站所記錄得的每分鐘平均風速(圖五)在 24 日早上 2 時至 6 時急速增加，由 20 海里/小時急升至約 60 海里/小時，陣風更達 100 海里/小時。而風向在當日凌晨亦起了急速變化，由東轉至早上 4 時的東南。在當日餘下時間風向相當穩定。在早上 4 時當大風坳轉為東南風後，天文台收到抵港航機報告在機場的西面約一海里處遇上強烈湍流，這是第一個湍流報告。該班飛機未能成功降落，須要進行復飛。在早上 4 時 16 分，這班飛機從西面再試圖降落，但又再因遇上強烈湍流而轉飛至其他機場。

由 24 日凌晨至早上 4 時，大嶼山附近多個氣象站的風都有轉向東南現象，但其程度不一（圖六）。大風坳氣象站位於山峽的位置，狹谷座向為東南—西北。受到地形的影響，當盛行風向由東轉至東南時，大風坳風向亦快速轉變為東南，而受到山峽地形環境影響，風速同時急速增加。位於地理環境相若的伯公坳氣象站的風速和風向也出現相似的情況。估計經過山峽而加速的東南氣流在下風與機場附近的東風相遇，引發強烈湍流。

### 4. 機場多普勒天氣雷達資料分析

天文台在機場東北約十二公里的大欖涌設置了一台機場專用的多普勒天氣雷達(位置見圖二)。該雷達面向機場跑道升降區並作多仰角的掃瞄(0.6 度至 60 度)以獲取機場附近地區的徑向風速和反射率數據，協助探測在機場附近出現的低空風切變和湍流。

圖七顯示了在 24 日早上 4 時由機場多普勒天氣雷達所探測得的 0.6 度仰角徑向風速，北跑道以西的升降區出現有明顯的徑向風速差異，

最低及最高數值分別約為 8 米/秒(15 海里/小時)及 20 米/秒(39 海里/小時)，顯示有風切變或湍流出現的可能性。但由於當日大部分時間赤蠟角處於與伊布都相關的雨帶外，天氣雷達所探測得的回波甚少，造成分析上的困難。

## 5. 激光雷達資料分析

天文台在 2002 年中於機場裝置的一套激光雷達系統正好在此個案中發揮作用。該系統設置於機場上的空中交通管制大樓頂部(位置見圖二)，能掃瞄機場兩條跑道附近的升降區，以探測可影響飛機升降的風切變。它利用紅外線探測空氣中微細粒子的移動，在無雨情況下最能發揮作用。其技術規格見表二[3]。

在 2003 年 7 月 23 至 24 日期間，激光雷達的主要掃瞄策略為 1.0 度和 4.5 度仰角的平面位置顯示器 (Plan Position Indicator, PPI)，以分別監察飛機降落及起飛時的風場變化；以及多方位角的距離高度顯示器 (Range Height Indicator, RHI) 以觀測南、北跑道及東涌峽方向附近垂直剖面的風場。

我們嘗試對激光雷達所探測得的徑向風速數據進行計算，得出分別在降落和起飛區域內徑向風速的標準差(註：簡稱區域徑向風標準差分析)，從而推算湍流出現的可能性。所選區域見圖八。

在 7 月 23 日晚上 8 時 47 分，一班沒有報告遇上湍流的飛機從西面降落在北跑道。當時激光雷達正以闊的帶寬模式作掃瞄(註：以量度較高的徑向風速，從而避免速度折疊，但掃瞄範圍會縮小至距離跑道大約 1.5 海里處)，仰角為 1.0 度 PPI 的徑向風速圖像(圖九)顯示北跑道以西徑向風場比較平均，大風區範圍較少[桃紅色的回波，徑向風速約 25 米/秒(49 海里/小時)]。區域徑向風標準差分析在有關時間地區平均風速 15.9 米/秒 (30.9 海里/小時)、標準差 1.2 米/秒 (2.3 海里/小時)。

24 日上午 10 時 35 分，一班抵港飛機在北跑道以西升降區報告遇上強烈湍流。激光雷達的 PPI 徑向風速圖像(圖十)顯示北跑道附近的大風區比前一天晚上經已擴大，而且夾雜著很多風速較少的回波，而且

這些回波的分佈也很不規則。從激光雷達的 258 度 RHI 徑向風速圖像中(圖十一)，可見在黑圈內區域有綠色及桃紅色回波，估計距離少於 300 米，其徑向風速差達 25 米/秒 (48.6 海里/小時)，其尺度及風速差顯示有湍流出現。區域徑向風標準差分析在有關時間地區平均風速 11.1 米/秒(21.6 海里/小時)、標準差 3.3 米/秒 (6.4 海里/小時)。可以留意到，當有強烈湍流時，區域徑向風標準差比在沒有湍流時大了一倍以上。

中午過後風勢繼續減弱，北跑道的大風區也逐漸縮小而且遠離北跑道以西的降落區，已再沒有收到強烈湍流報告，只有在晚上 8 時 06 分再有一班抵港飛機報告遇到中度湍流。激光雷達數據顯示北跑道以西的降落區的大風區已不存在，徑向風速的標準差也減少，趨勢與湍流報告分佈一致。

離港飛機方面，只有兩班在 24 日上午約 8 時及 3 班在晚上約 11 時，分別報告遇上強烈湍流，其餘的都是中度湍流報告。早上 8 時 11 分激光雷達仰角為 4.5 度的 PPI 徑向風速圖像(圖十二)顯示南跑道的東面也有很大的徑向風速差別，由最高 23 米/秒(45 海里/小時)至最低約 10 米/秒(19 海里/小時)，而且分佈極不規則。區域徑向風標準差分析在有關時間地區平均風速 13.9 米/秒(27.0 海里/小時)、標準差 3.2 米/秒(6.2 海里/小時)。

區域徑向風標準差分析全部 31 個湍流報告的有關區域和時間的徑向風速標準差 (見表一)，發現強烈湍流相關區域的平均標準差為 3.1 米/秒 (6.0 海里/小時)，中度湍流徑向風速相關區域的平均標準差則為 2.7 米/秒 (5.3 海里/小時)。另外，計算在 7 月 23 及 24 日 4 班沒有湍流報告的航機其相關的區域徑向風速標準差，平均 1.5 米/秒 (2.9 海里/小時)。這顯示激光雷達確能在湍流發生時，量度到在相關地區的徑向風速標準差有明顯增加，湍流強度越高，徑向風速標準差越大。

## 6. 飛機數據分析

對 7 月 24 日多班遇上湍流的飛機在航行時所記錄得的風速風向及垂直加速率數據，我們亦嘗試作出分析。飛機在航行時的逆風風速或垂

直加速率波動越大越急速時，表示飛機遇上越強的湍流。根據國際民用航空組織(ICAO)[4]及世界氣象組織(WMO)[5]的標準，飛機垂直加速率與地心吸力加速率  $g$  ( $1.0 g = 9.8 \text{ 米/秒}^2$ ) 的差別達  $0.5 g$  時表示有中度湍流、達  $1.0 g$  時則表示有強烈湍流。

在 23 日晚上 8 時 47 分降落的一班沒有報告遇上湍流的飛機，錄得垂直加速率及逆風風速只有很小的波動及變化。垂直加速率與地心吸力加速率的差別大部份時間小於  $0.1 g$ 。

24 日早上 8 時 11 分離港的一班飛機報告遇到強烈湍流，其逆風風速與垂直加速率的波動頻率及波幅都高。飛機垂直加速率與地心吸力加速率的差別最高達  $0.3 g$ ，而逆風風速也在同時起了較大波動(圖十三)。波動在起飛後持續了約 3 分鐘，當飛機爬升至約 6000 英尺(約離機場 9 海里處)後即告消失。

同日早上約 8 時 27 分，一班抵港飛機下降至約 2500 呎高度(約離機場 9 海里處)報告遇上強烈湍流。這班航機的垂直加速率在降落前約 4 分鐘內有極大的波動，幅度和頻率都高。垂直加速率與地心吸力加速率的差最高約達  $0.6 g$ ，逆風風速同時也起了頗大波動(圖十四)。

分析其他遇有強烈湍流的航機也得到類似的結果。總括而言，航機遇上湍流時垂直加速率與逆風通常持續波動約 3 至 4 分鐘時間，湍流影響所及的區域包括機場至東西兩邊約 9 海里遠。報告強烈湍流的航機其垂直加速率與地心吸力加速率的差別介乎  $0.3$  至  $0.6 g$ ，而報告中度湍流的則介乎  $0.2$  至  $0.25 g$ 。可留意到航機報告遇有中度或強烈湍流時垂直加速率最大值相比國際參考的標準都要低。

## 7. 激光雷達與飛行數據的綜合分析

我們對 7 月 23 日晚上至 25 日早上一共 63 班降落航機的飛行數據進行分析(註:其中 4 班報告遇到湍流)，計算每小時每班航機的垂直加速率與地心吸力加速率之間差的最大值，所得結果再計算平均數(註:簡稱垂直加速率每小時平均差數)。圖十五比較由 23 日下午 2 時至 25 日早上 6 時從激光雷達得出的區域徑向風標準差、光譜寬和同期由抵港航班的飛行數據記錄的垂直加速率每小時平均差數。圖表顯示

幾組數據的相關性很高，都是在 7 月 24 日早上達至最大值。所有強烈湍流報告都在當徑向風速標準差達到 6.0 海里/小時或以上及光譜寬達 8.0 海里/小時或以上時收到。

另一方面，我們亦對 7 月 24 日 19 班離港航機的飛行數據進行同樣的分析（註：其中 3 班報告遇到湍流），相應數據見圖十六。徑向風速標準差或光譜寬在 7 月 24 日清晨約 2 時達至最大值，之後徐徐下降。飛行數據亦顯示垂直加速率的波動在下午及晚上有逐漸下降的跡象，但在晚上 10 時至 12 時再收到 3 個強烈及 5 個中度湍流報告，而飛行數據卻顯示垂直加速率每小時平均差數在有關時間少於 0.25 g，以國際標準只屬輕度湍流。這顯示航機機師可能高估了湍流的強度等級。由於清晨時份只有極少離港航班，因此在該時段亦缺乏湍流報告或飛行數據以作分析。

## 8. 風切變及湍流警告系統的湍流預警能力

天文台的風切變及湍流警告系統，利用機場附近的氣象站所量度的風速及風向數據進行運算，計算出一個可代表機場及其升降區內湍流強度的數值，從而發出湍流警告[6]。該系統由 7 月 23 日中午至 24 日晚上大部份時間發出中度或強烈湍流預警。在抵港飛機方面，由 23 日晚上 10 時至 24 日中午時段主要為強烈湍流預警。在離港飛機方面，強烈湍流預警集中在 24 日凌晨至當日中午。25 日凌晨開始，系統再沒有發出湍流預警。

在 7 月 24 日凌晨至中午，根據上文激光雷達及航行數據的分析，是湍流最強烈的時段，同時亦有多班抵港及離港飛機遇到湍流，大部份是強烈湍流，這與風切變及湍流警告系統發出的強烈湍流預警是非常一致的。下午時段，風力明顯減弱，所有飛機湍流報告強度都由強烈變為中度，這與系統發出的中度湍流預警也是一致的。

在所有 31 個湍流報告中，除了在 24 日晚上 5 班離港飛機報告的中度湍流外，系統都有發出湍流預警，成功率達 84 %。如第七節所述，該 5 個湍流報告與激光雷達分析及飛行數據未能配合，推測有關機師可能高估了湍流的強度等級。另一方面，在 7 月 23 日並沒有飛機報告遇到湍流，系統似乎過早發出湍流預警。



## 9. 總結

綜合以上各項分析，我們得出以下結論：

- (1) 7月24日的湍流主要是由地形引致的。特別地，當大風坳及伯公坳氣象站轉吹強烈東南風時，湍流即在機場附近出現，這顯示穿越山峽的加速氣流在此個案中擔當了重要的角色。
- (2) 激光雷達能在探測湍流方面提供有用情報。區域徑向風標準差分析與反映大氣湍流情況的飛機垂直加速率數據的相關性甚大。當激光雷達探測到在大風區之中有尺度細小而排列又不規則的回波出現，徑向風速標準差亦很大時，即表示有湍流發生的可能性。
- (3) 機師報告湍流的強度與國際標準有分別，報告往往高估湍流的強度。將來在發展湍流的預報技巧時，須小心分辨飛機湍流報告在有關湍流強度方面的真確性，以減低預報系統的虛報率。
- (4) 最後，風切變及湍流警告系統對個案大部份(84%)的飛機報告都成功發出了預警，但它亦有可能過早地發出預警。展望將來，激光雷達是一個有效監測及分析湍流的工具，可以在湍流預警中發揮更大的作用。

## 致謝

我們衷心感謝國泰航空有限公司為香港天文台提供飛機在航行時所記錄的飛行及氣象數據，作為本文分析之用。同時，我們亦非常感謝飛機師為香港天文台提供有關風切變及湍流的報告，對飛機航行安全發揮了重要作用。

## 參考文獻

- [1] 胡仲偉及李淑明, 2001: 由地形引致的風切變—颱風約克的啟示。第十五屆粵港澳氣象科技研討會〔二零零一年二月十四至十五日〕，專題報告第67號，香港天文台，166-184。
- [2] Shun, C. M., S.Y. Lau and O.S.M. Lee, 2003: Terminal Doppler Weather Radar Observation of Atmospheric Flow over Complex Terrain during Tropical Cyclone Passages. *J. App. Meteor.*, 42,

1697-1710.

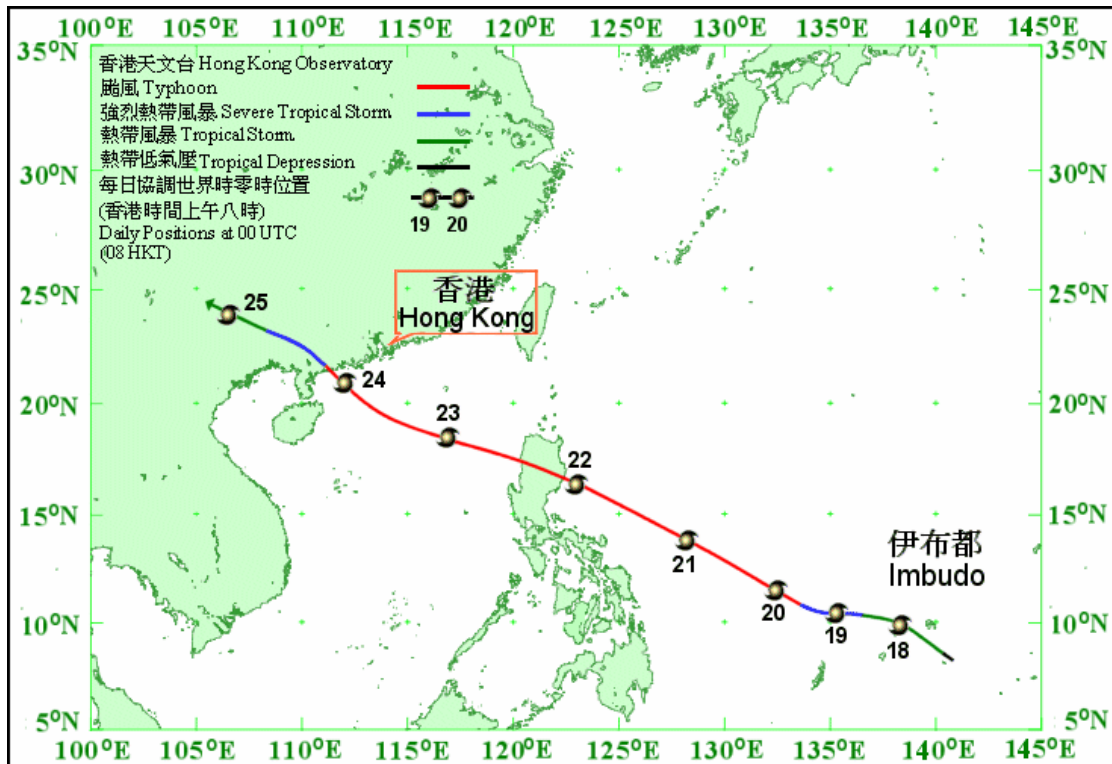
- [3] Shun, C. M. and S.Y. Lau, 2002: Implementation of a Doppler Light Detection and Ranging (LIDAR) System for the Hong Kong International Airport, 10th Conference on Aviation, Range & Aerospace Meteorology (Portland, Oregon), American Meteorological Society.
- [4] ICAO, 1996: Rules of the Air and Air Traffic Services, ICAO Doc 4444-RAC/510, 13th Ed., A1-3.
- [5] WMO, 1988: Manual on Codes, Vol. I, WMO – No. 306, I-D-16.
- [6] 香港天文台及國際航空公司飛行員協會, 2002: 在香港出現的風切變及湍流: 供飛行員參考的資料。

表一 湍流報告列表及激光雷達徑向風速標準差(計算範圍見圖八)

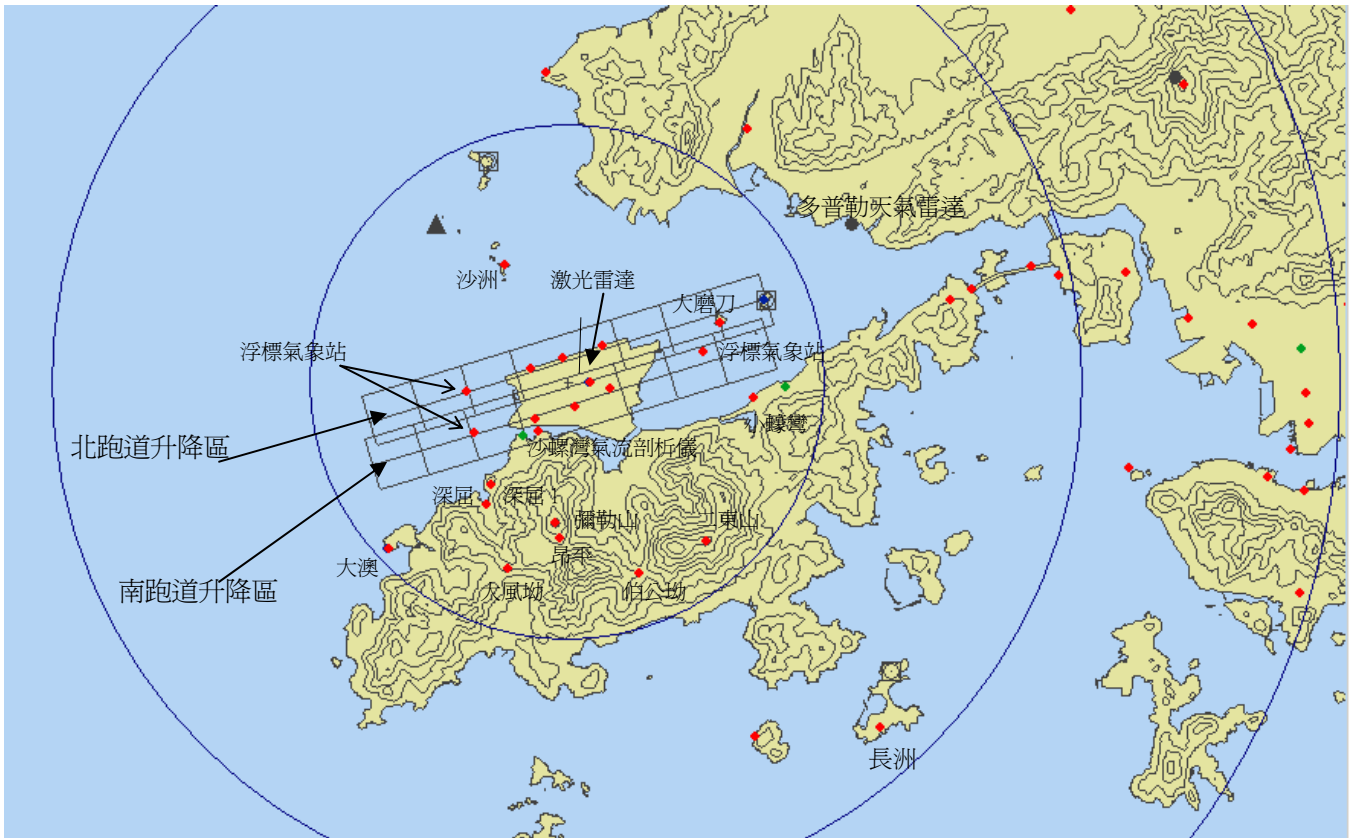
日期	香港時間	降落或起飛	飛機報告湍流強度	徑向風速標準差 (海里/小時)
2003年7月23日	13:47	起飛	沒有報告湍流	2.9
2003年7月23日	13:57	降落	沒有報告湍流	3.1
2003年7月23日	20:15	起飛	沒有報告湍流	3.3
2003年7月23日	20:47	降落	沒有報告湍流	2.3
2003年7月24日	4:00	降落	強烈	9.1
2003年7月24日	4:16	降落	強烈	5.1
2003年7月24日	8:11	起飛	強烈	6.2
2003年7月24日	8:20	起飛	強烈	5.2
2003年7月24日	8:27	降落	強烈	6.8
2003年7月24日	8:46	起飛	中度	6.2
2003年7月24日	8:52	降落	強烈	5.8
2003年7月24日	10:08	降落	強烈	8.0
2003年7月24日	10:35	降落	強烈	6.4
2003年7月24日	10:41	降落	中度	8.0
2003年7月24日	11:01	降落	中度	7.4
2003年7月24日	11:04	降落	中度至強烈	6.4
2003年7月24日	11:15	降落	強烈	5.6
2003年7月24日	11:45	降落	中度	7.0
2003年7月24日	11:58	降落	中度至強烈	6.0
2003年7月24日	12:08	降落	中度至強烈	6.4
2003年7月24日	12:10	降落	中度	6.4
2003年7月24日	13:19	起飛	中度	5.2
2003年7月24日	13:38	起飛	中度	4.5
2003年7月24日	15:34	起飛	中度	5.1
2003年7月24日	16:04	起飛	中度	4.9
2003年7月24日	16:12	起飛	中度	5.4
2003年7月24日	20:06	降落	中度	4.9
2003年7月24日	22:43	起飛	中度至強烈	4.3
2003年7月24日	22:46	起飛	中度至強烈	4.5
2003年7月24日	22:52	起飛	強烈	4.5
2003年7月24日	23:22	起飛	中度	4.3
2003年7月24日	23:32	起飛	中度	3.9
2003年7月24日	23:34	起飛	中度	3.9
2003年7月24日	23:37	起飛	中度	3.7
2003年7月24日	23:39	起飛	中度	3.7

表二 激光雷達技術規格

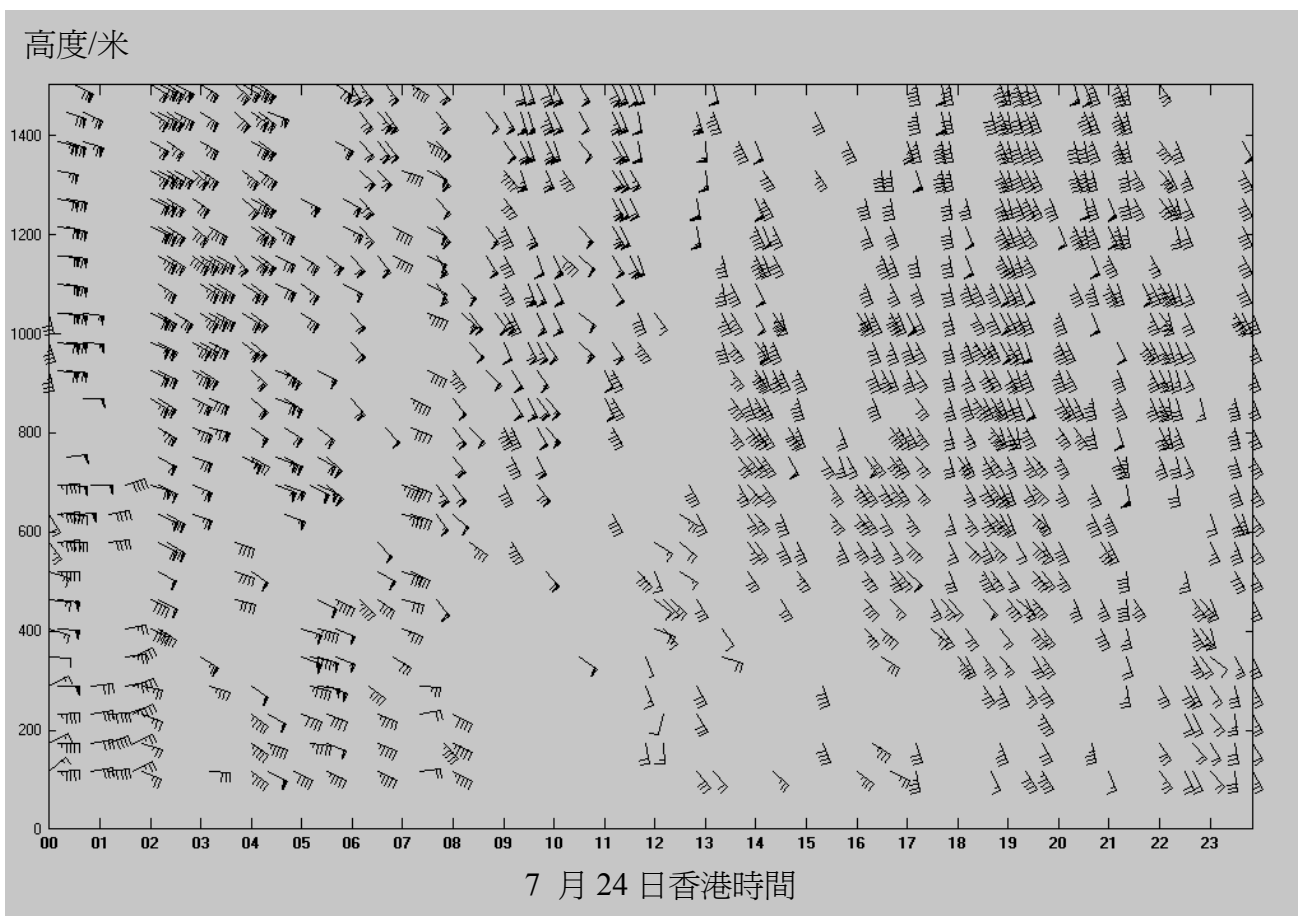
脈衝波長	2 微米
脈衝能量	2 毫焦耳
脈衝時間	900 納秒
孔徑直徑	10 厘米
距離解析度	100 米
覆蓋範圍	400 米 至 10 公里
脈衝重複頻率 (Pulse repetition frequency)	10 赫



圖一：2003 年 7 月 17 至 25 日伊布都 (0307) 的路徑圖

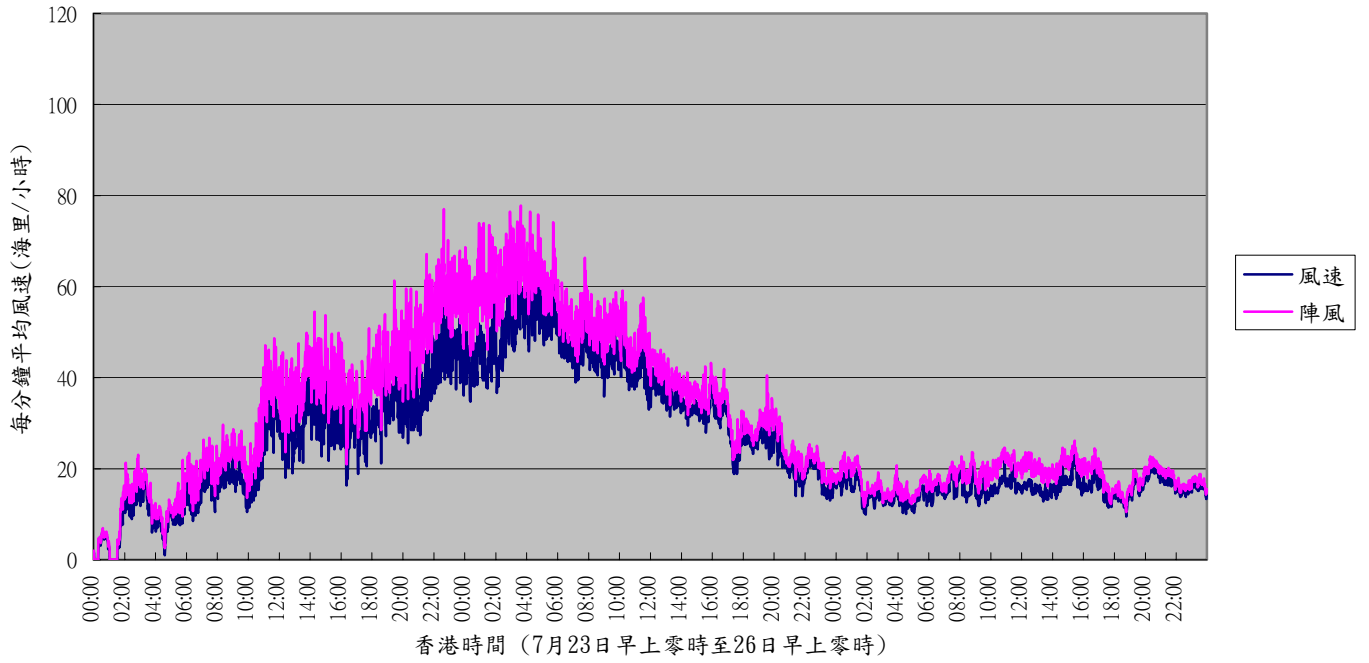


圖二：機場多普勒天氣雷達、激光雷達及部份氣象站位置

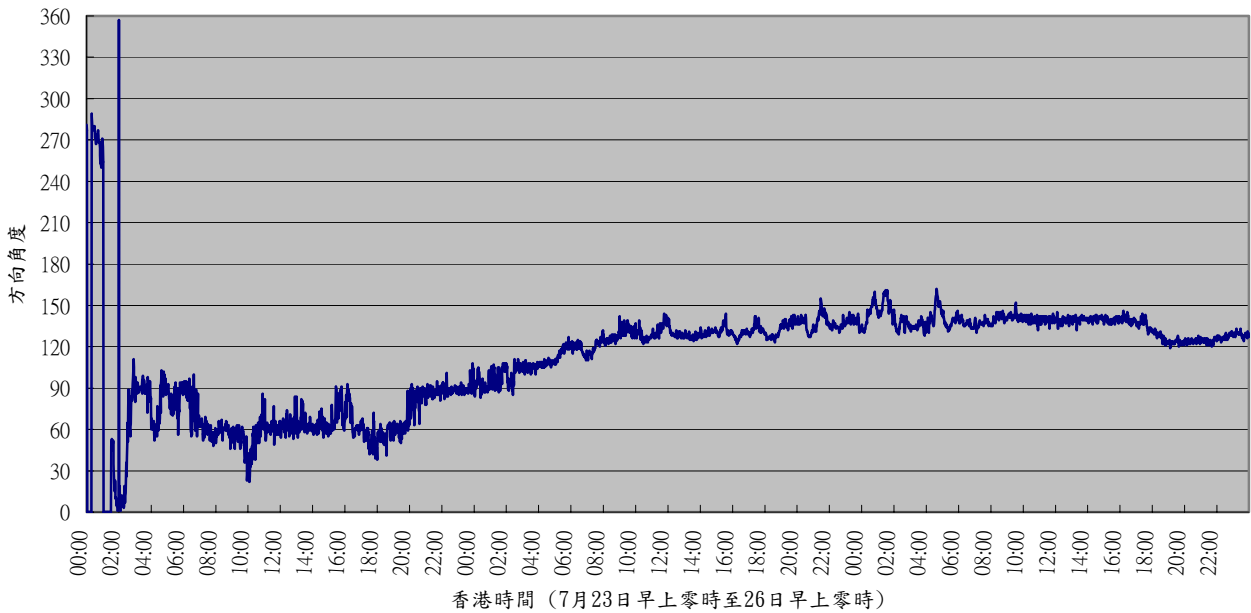


圖三：沙螺灣氣流剖析儀風速風向

## 風速

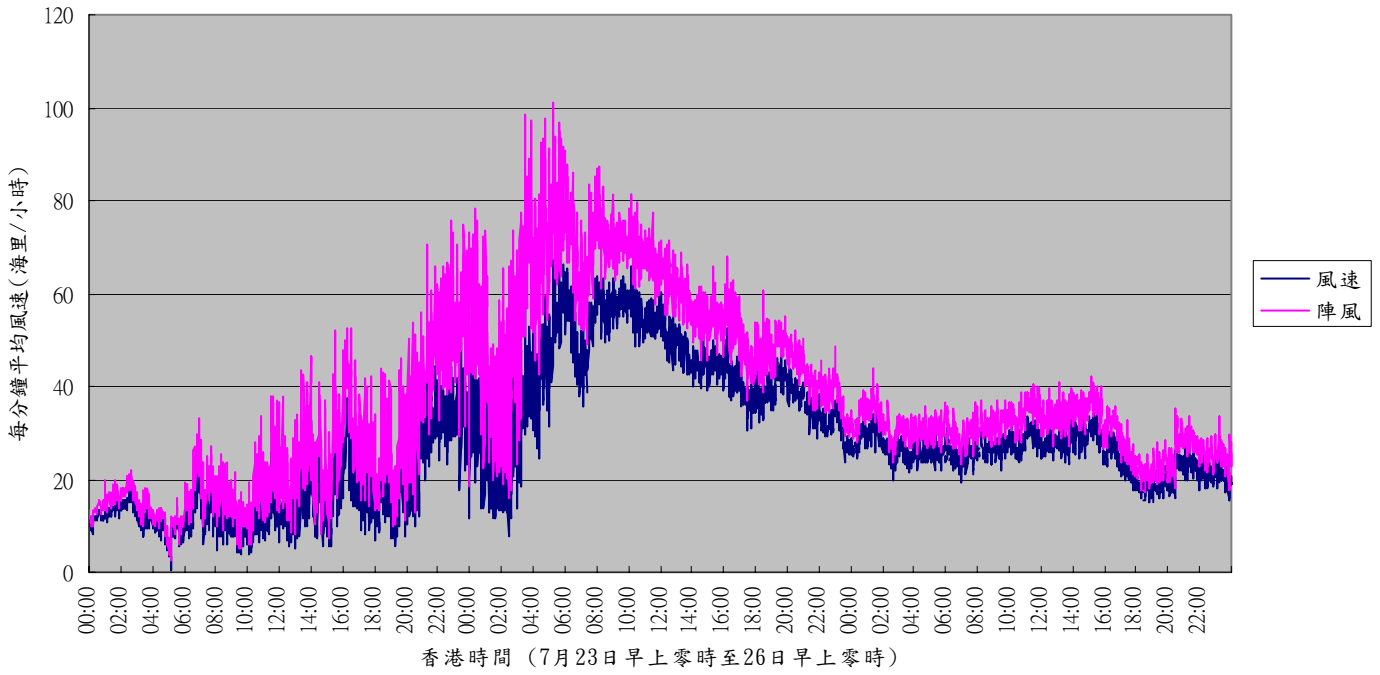


## 風向

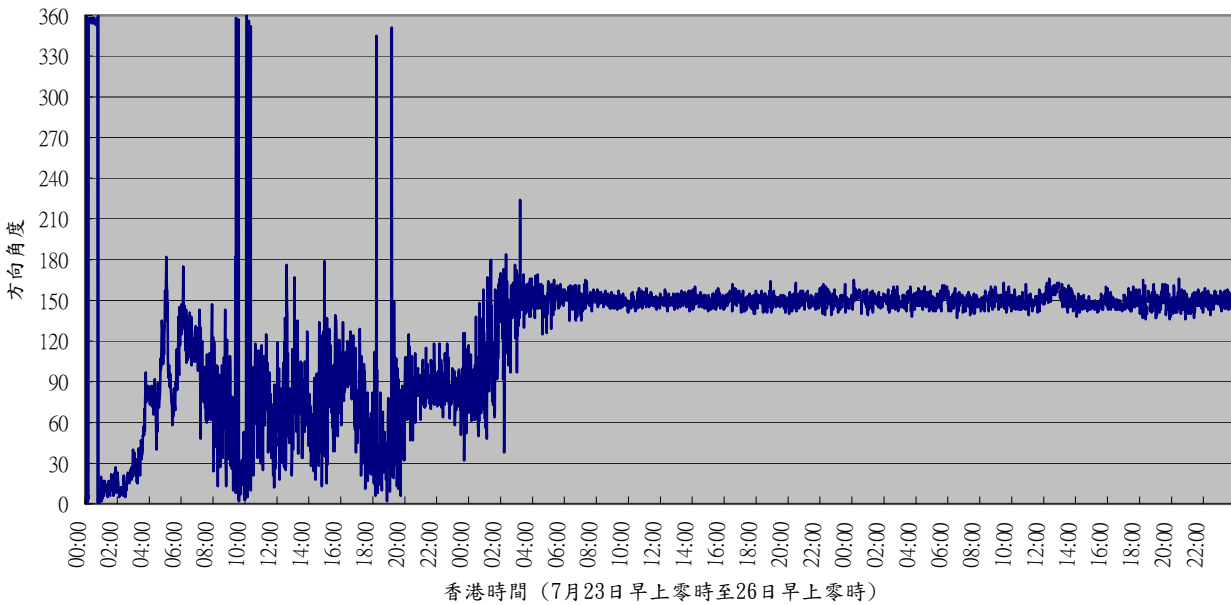


圖四：7月23至25日長洲氣象站風速及風向

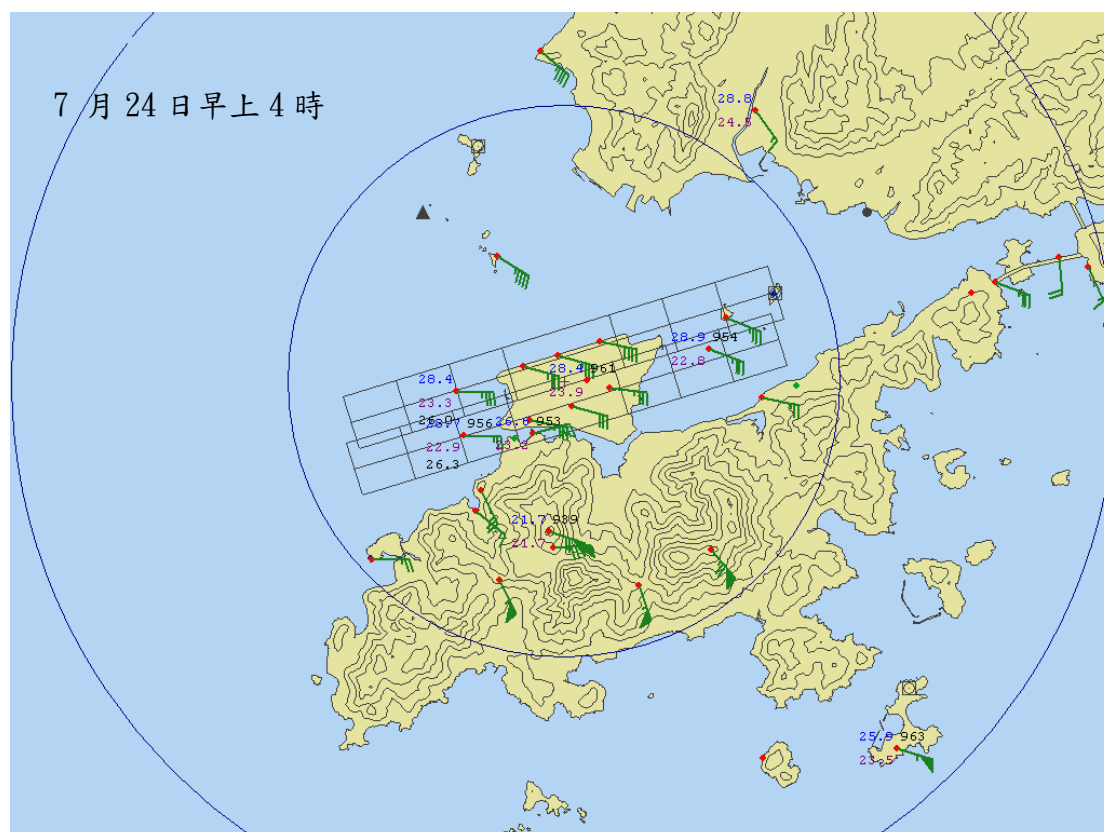
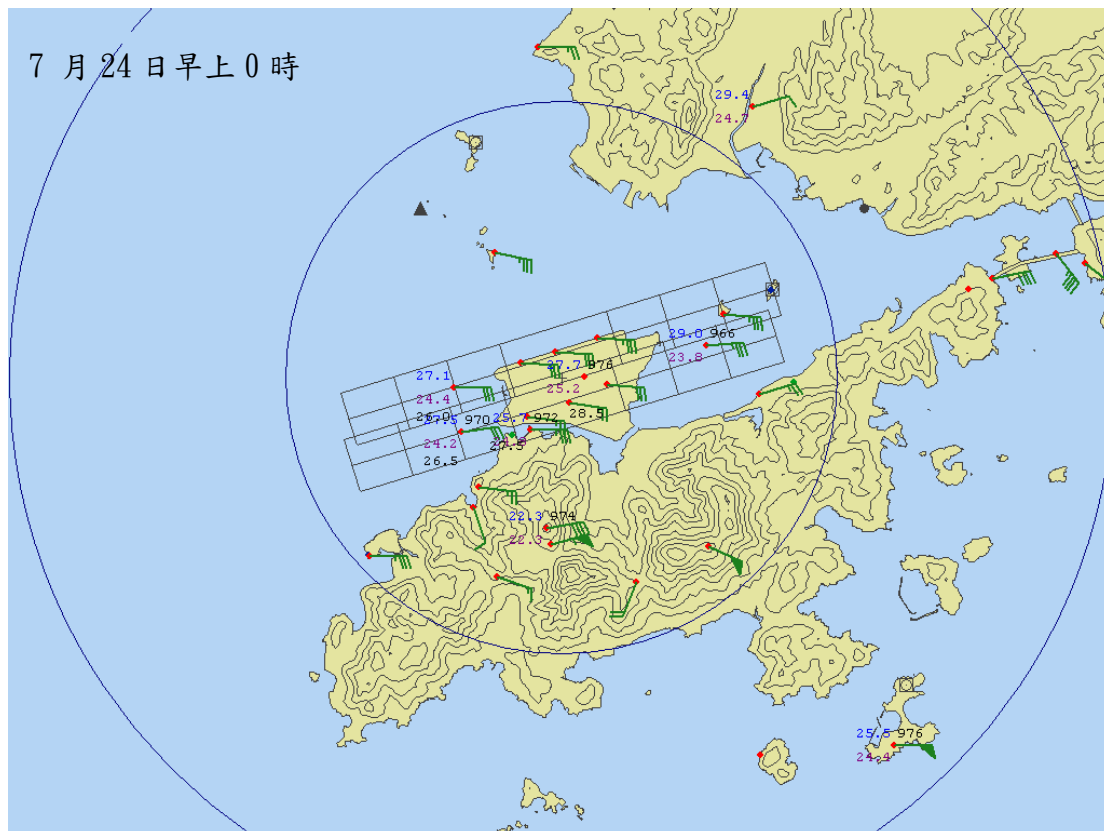
## 風速



## 風向

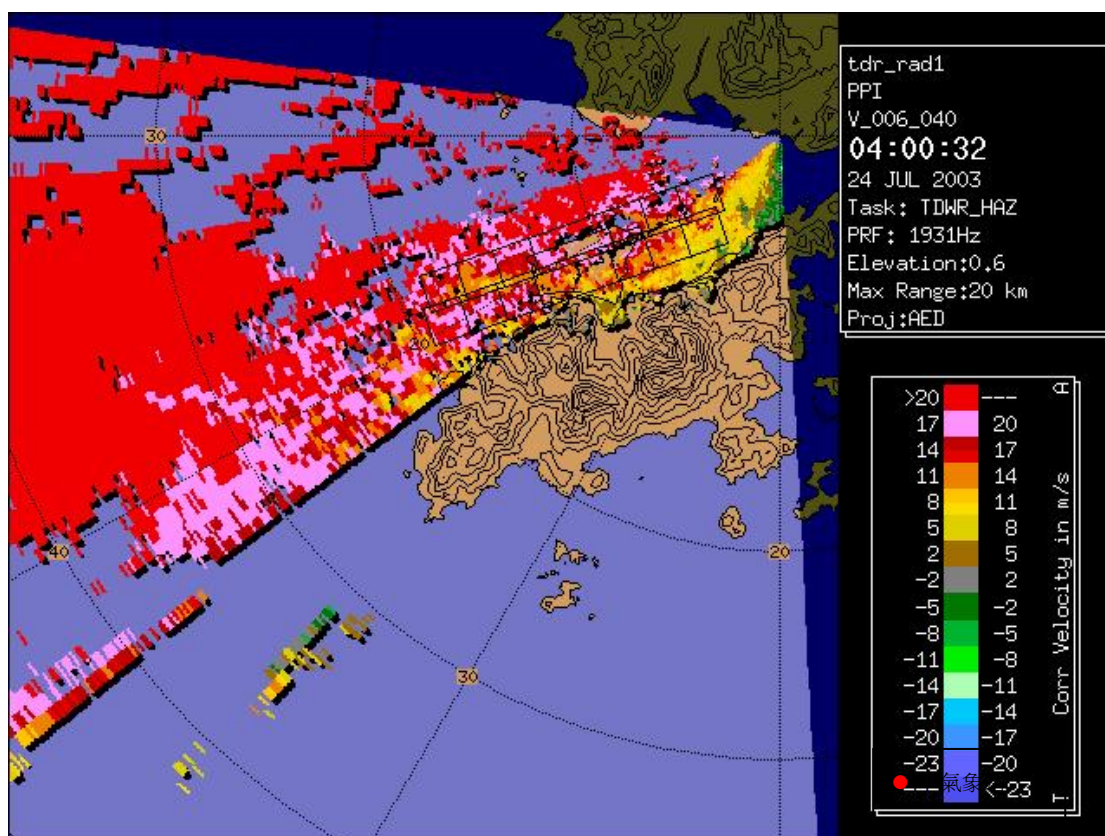


圖五：7月23至25日大風坳氣象站風速及風向

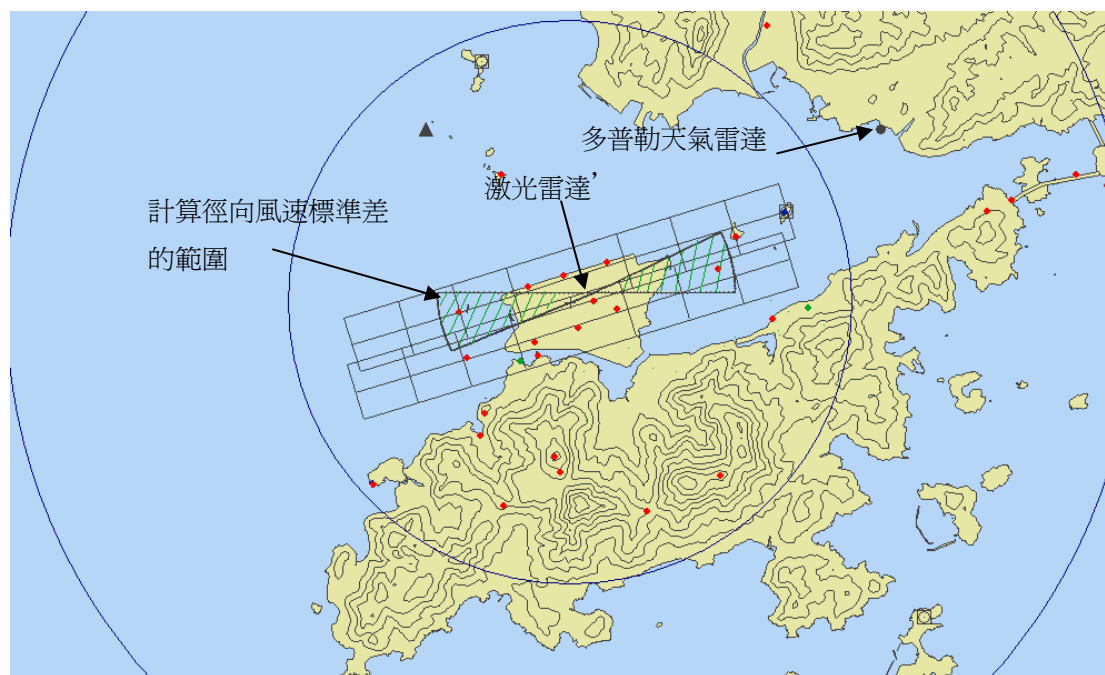


圖六：赤蠟角附近氣象站的一分鐘平均風速及風向

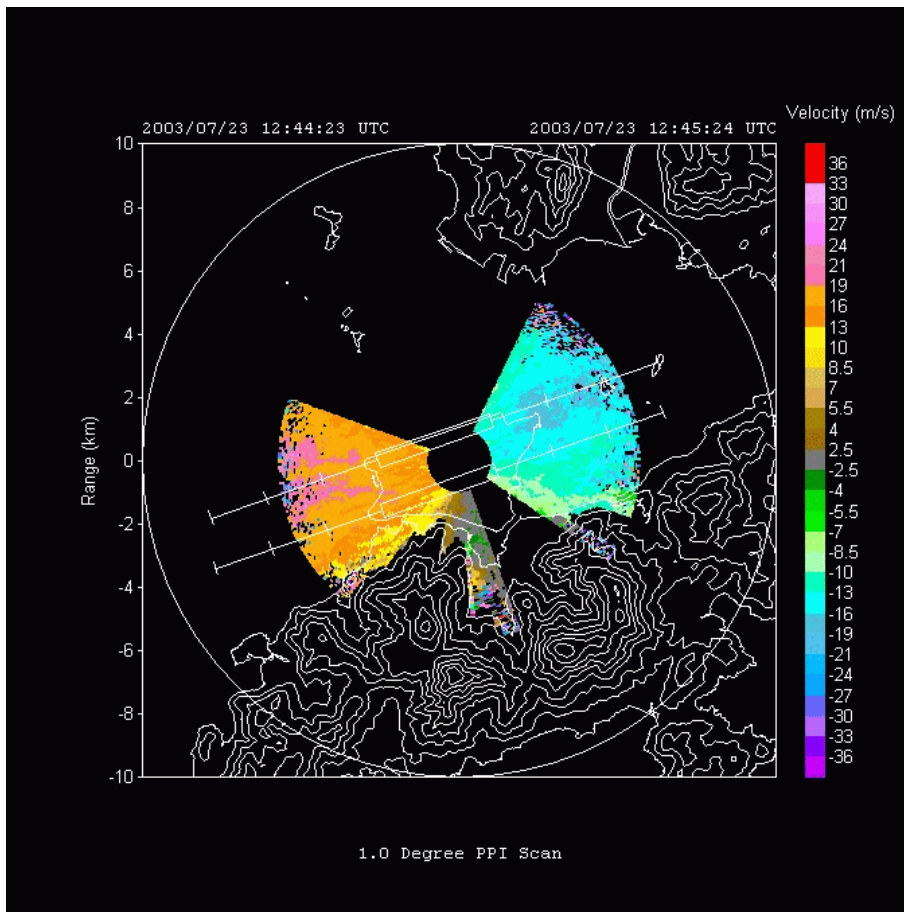




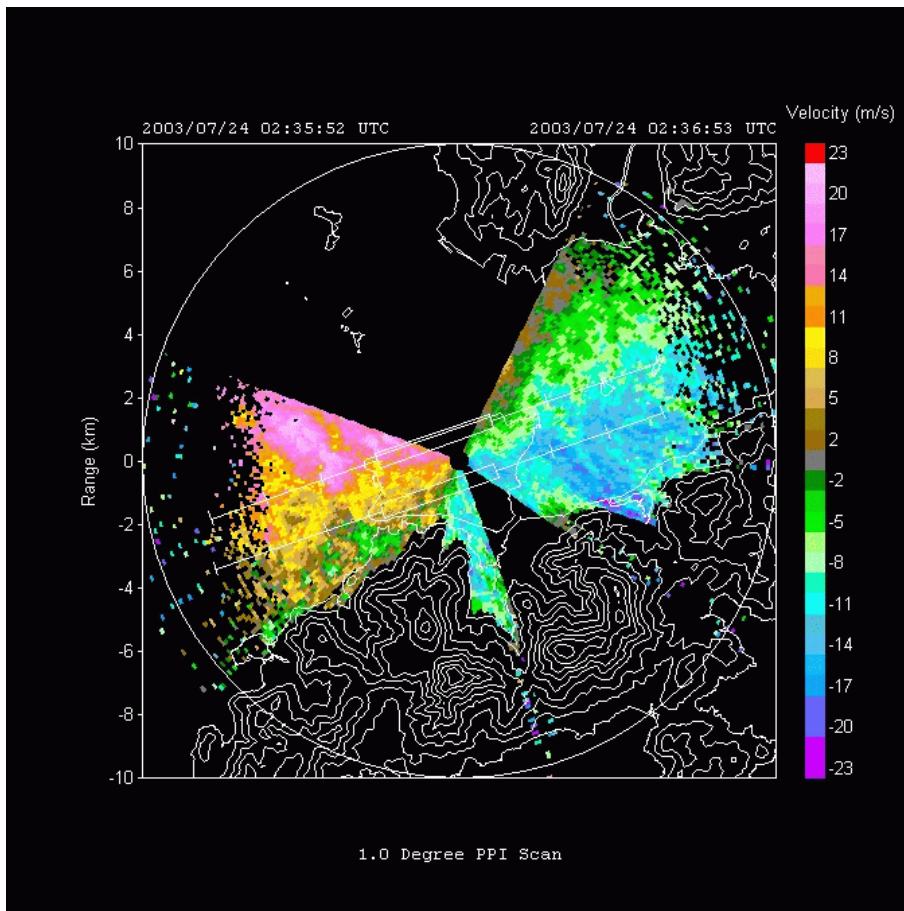
圖七：2003 年 7 月 24 日早上 4 時機場多普勒天氣雷達 0.6 度 PPI 徑向風速圖像



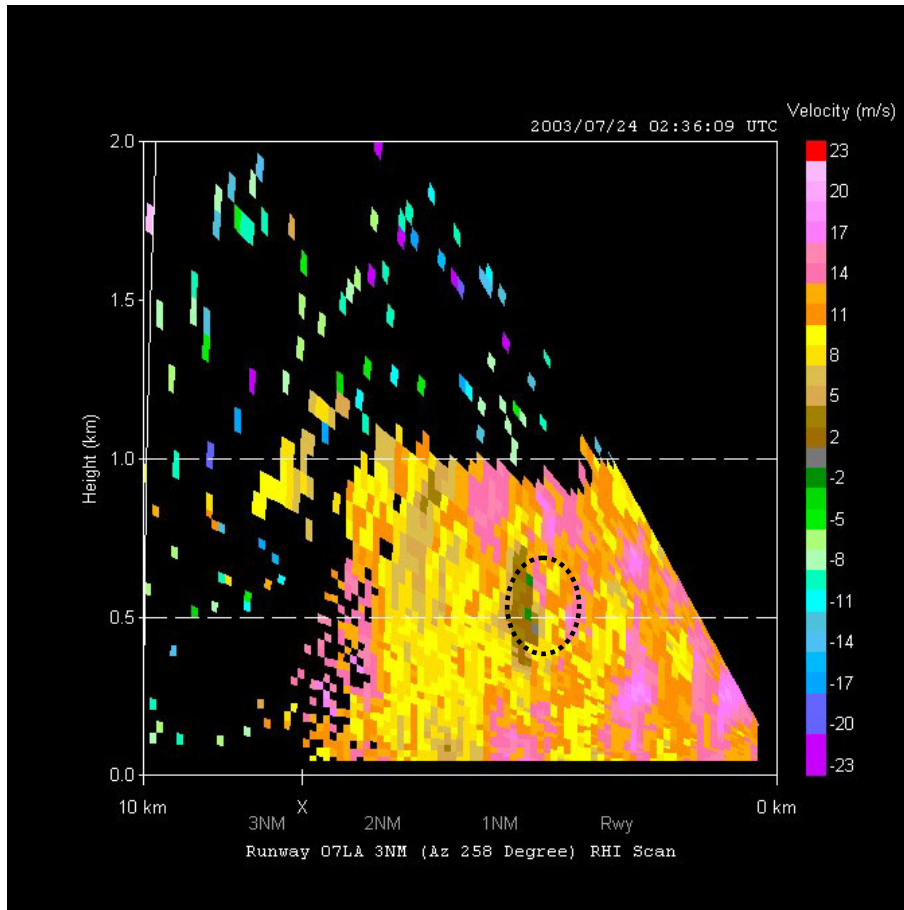
圖八：計算激光雷達徑向風速標準差的範圍



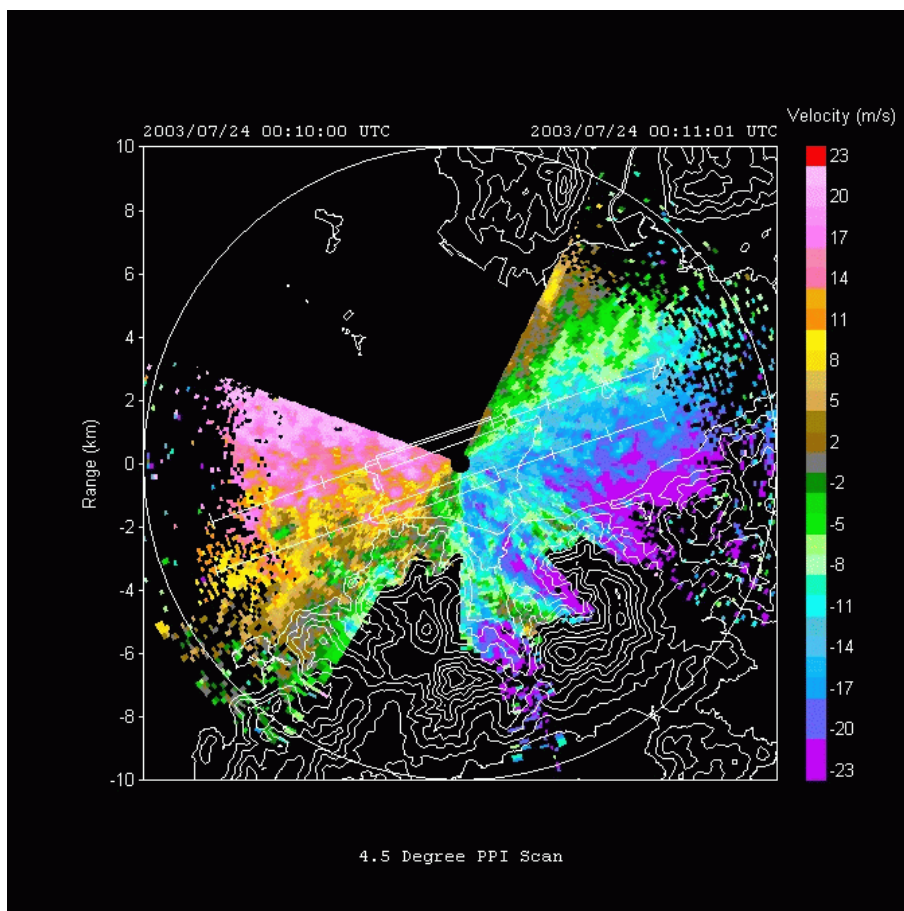
圖九：7月23日晚上8時45分之激光雷達仰角1.0 PPI 徑向風速圖像



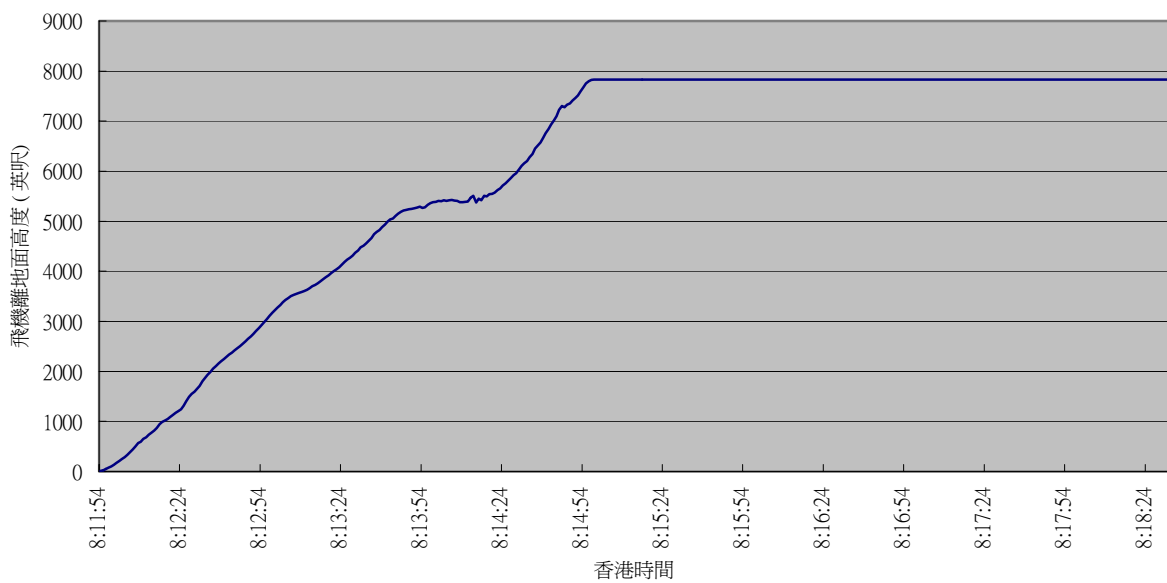
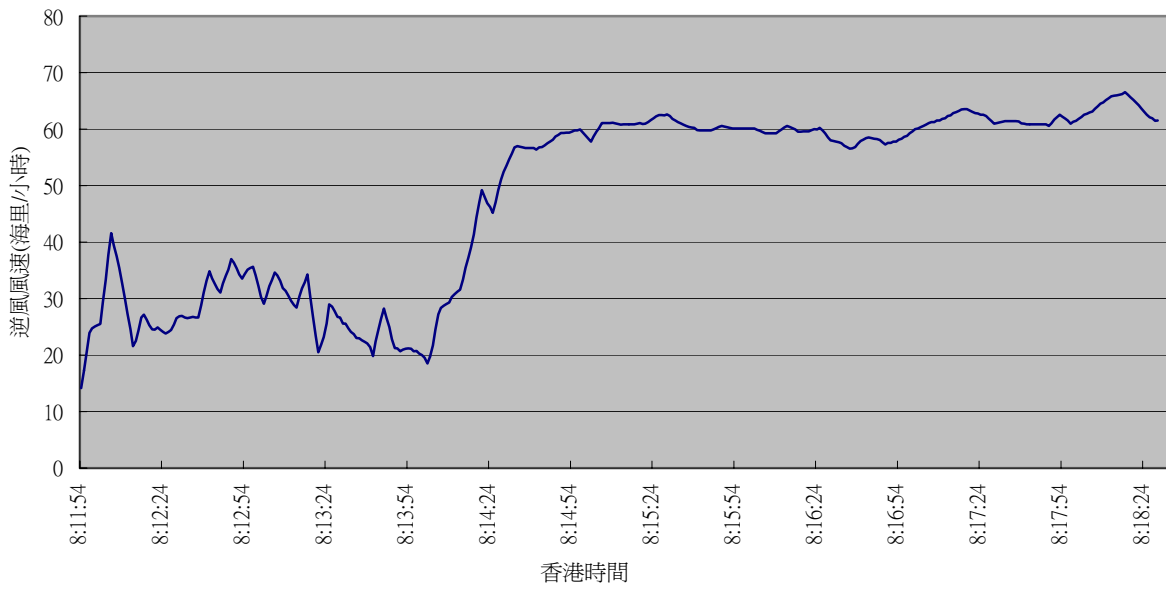
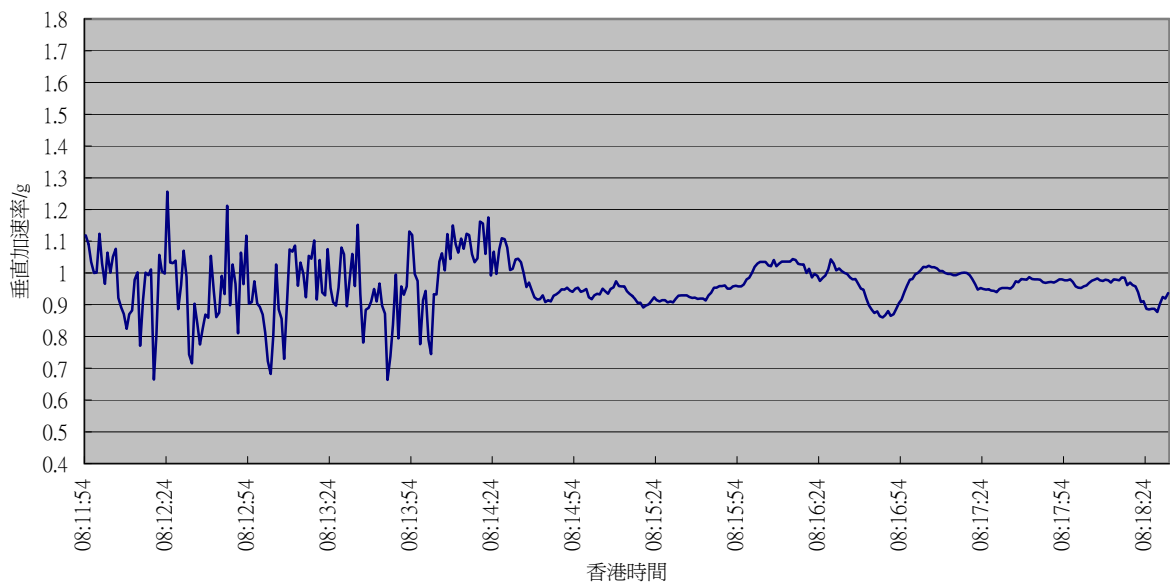
圖十：7月24日早上10時36分之激光雷達仰角1.0 PPI 徑向風速圖像



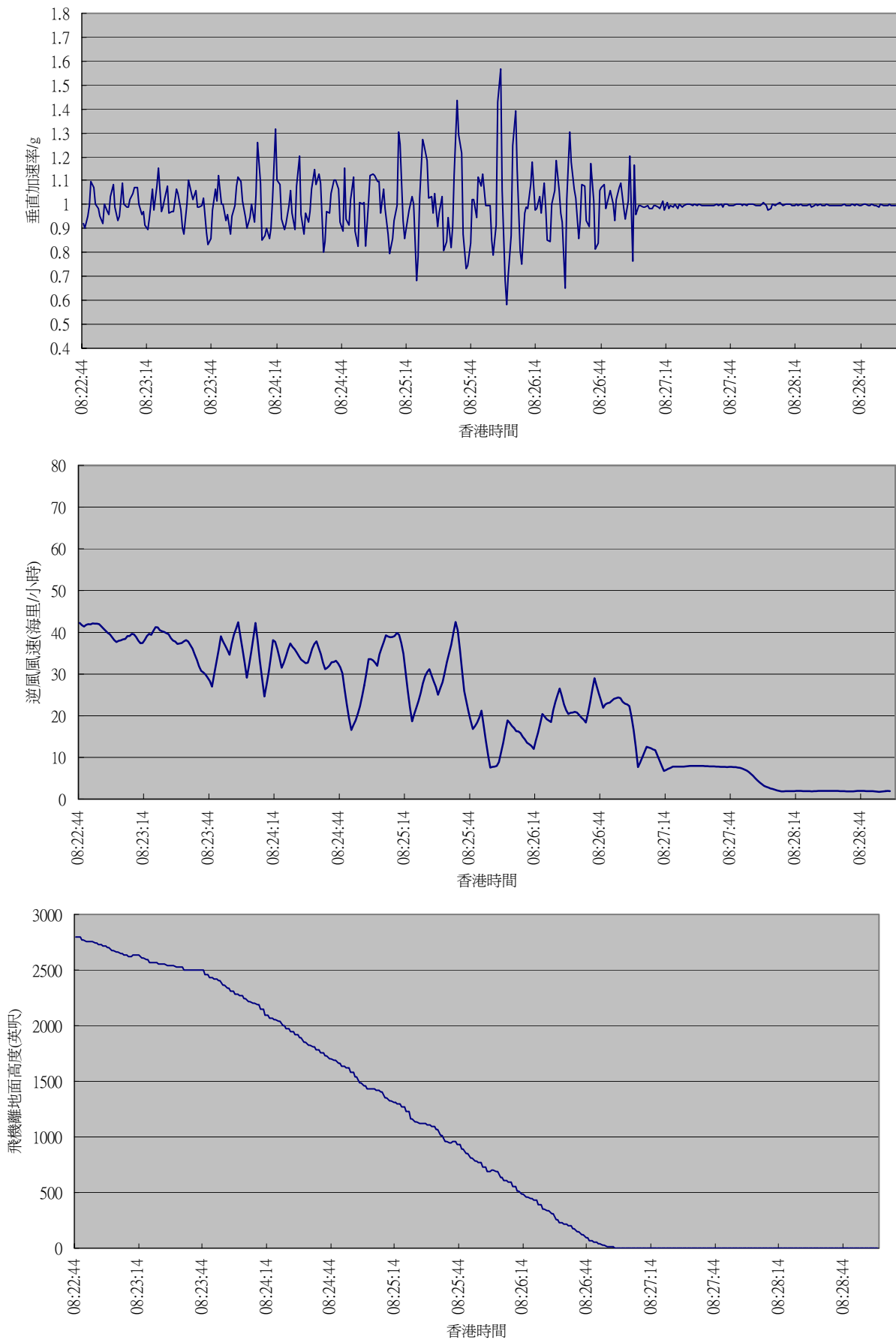
圖十一：7月24日早上10時36分之激光雷達RHI 258度徑向風速圖像



圖十二：7月24日上午8時11分之激光雷達仰角4.5 PPI 徑向風速圖像

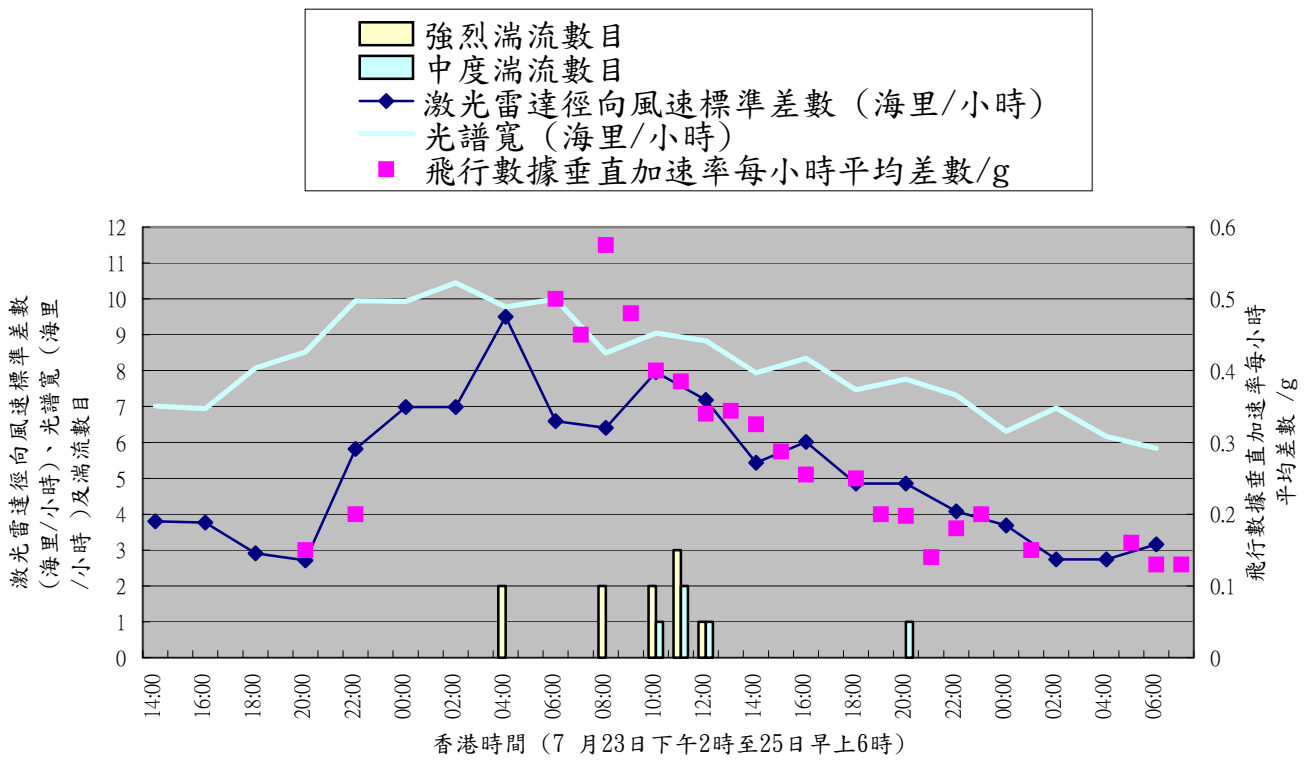


圖十三: 2003年7月24日早上8時11分一班報告強烈湍流的離港飛機的垂直加速率、逆風風速及飛機距離地面高度

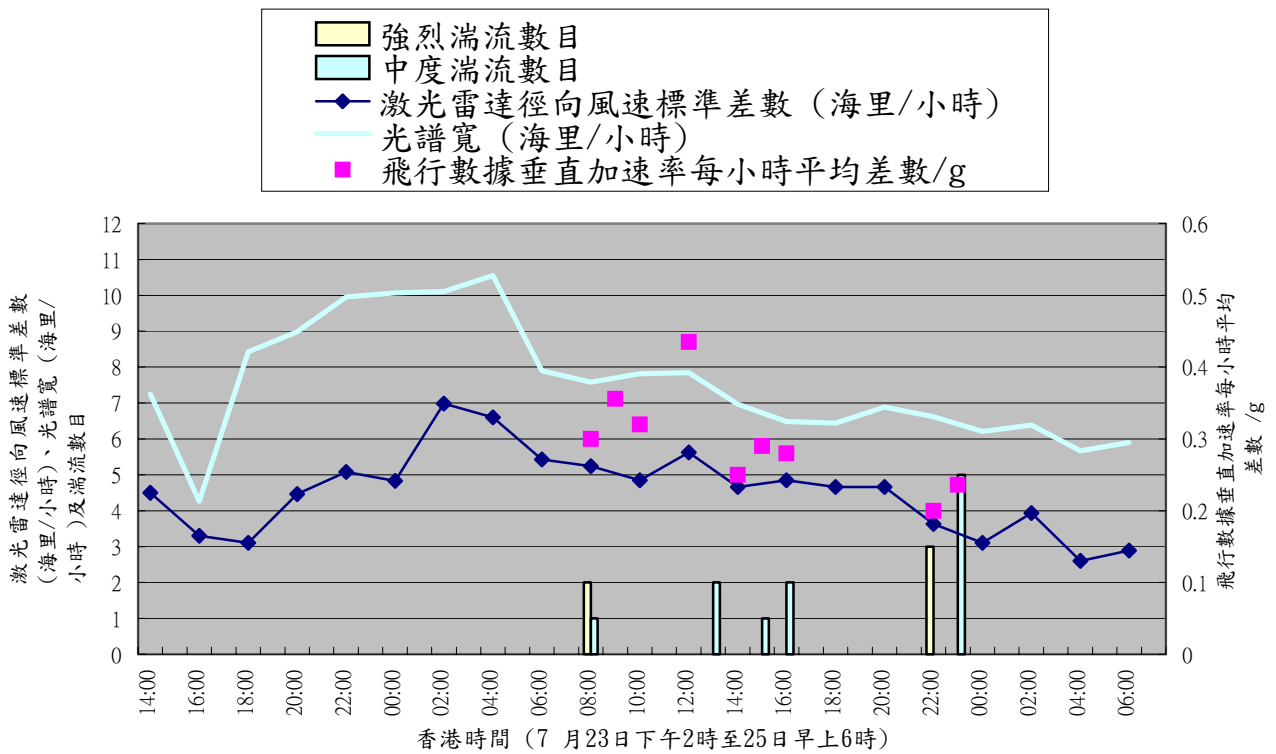


圖十四：2003年7月24日早上8時27分一班報告強烈湍流的抵港飛機的垂直加速率、逆風風速及飛機距離地面高度





圖十五：垂直加速率、激光雷達徑向風速標準差，光譜寬及抵港飛機湍流數目



圖十六：垂直加速率、激光雷達徑向風速標準差、光譜寬及離港飛機湍流數目