

Reprint 418

由地形引致的風切變 - 颱風約克的啓示

胡仲偉，李淑明

第十五屆粵港澳重要天氣研討會，
香港，中國，二零零一年二月十四至十六日

由地形引致的風切變 - 颱風約克的啓示

胡仲偉、李淑明

香港天文台

摘要

香港國際機場位於地形複雜的大嶼山北面約五公里。大嶼山有一列大致成東北-西南走向的山脈，個別山峰可達 750 至 950 公尺。機場的東北面約十公里處亦有山脈。空氣受地形的阻擋，在山脊和山谷下風的地方不時出現不同強度的風切變和湍流，其中一些更能影響於香港國際機場升降的航班。

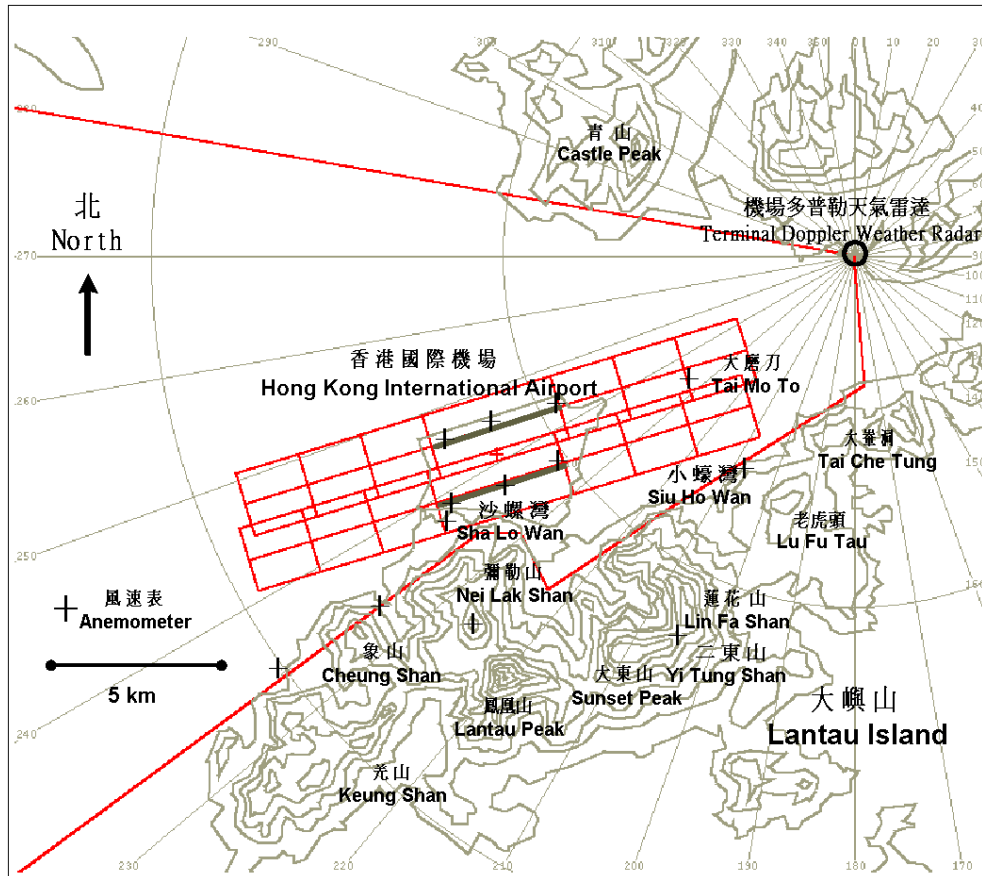
一九九九年九月十六日清晨，位於香港東南的颱風約克開始向西北方向移動，直趨香港。初時香港普遍吹北風，但當約克逐漸逼近，在中午時分香港國際機場轉吹偏東風。下午約克在機場西南掠過，機場附近轉吹西南風。隨著風向的改變，機場附近的山脊和山谷下風的地方出現不同類型和強度的風切變。本文透過機場多普勒天氣雷達的觀測資料，分析這些由地形引致的風切變。在有雨的天氣情況下，機場多普勒天氣雷達的高解像資料，對監測風切變十分有用。最後本文將探討颱風約克對改善機場風切變預報的啓示。

1. 引言

香港國際機場的地理環境

香港國際機場位於大嶼山北面一小島赤鱘角之上(見圖一)。大嶼山為一東北至西南走向的島嶼，大概有二十公里長、五公里寬，山巒起伏。島上較大的山脈有鳳凰山、彌勒山、大東山、二東山和蓮花山，其中大東山、二東山加上蓮花山形成一個半月形的屏障。各主要山峰高度為 700 至 950 米，山谷高度則由 350 米至 450 米。在赤鱘角東北面，一海之隔聳立了高逾 500 米的青山。

香港國際機場附近群山環抱，當氣流受到山脈阻隔，在某些天氣條件配合下（主要因素為低空風速、風向及穩定度等），在山脊和山谷下風的地方不時會出現風切變，影響航班的升降。



圖一 香港國際機場及其鄰近地區的地形及氣象設備
(等高線間隔為 100 米，紅色方格為南北跑道升降區)

機場天氣雷達

天文台在大欖涌安裝了一台機場專用的機場多普勒天氣雷達(Terminal Doppler Weather Radar)。在美國已有四十五部同類型的雷達安裝於各機場。香港的機場多普勒天氣雷達站位於赤鱗角東北約十二公里的大欖涌(見圖一)，面向機場跑道升降區。雷達的天線安裝在離海平面約六十米的高度，以減少船隻對雷達波束的影響。機場多普勒天氣雷達波長五公分，半功率波束寬度是 0.55 度，雷達利用窄波寬的波束及高穩定度的調速管發射機來減少雜波(clutter)¹，因此特別適用於機場附近雜波較多的環境。另一方面，它能以兩種不同的脈衝重覆頻率(pulse repetition frequency)作 0.6 度低仰角掃瞄來退掉速度模糊(velocity dealiasing)，這功能使它在風速大的情況下也能準確地量度徑向風速(radial velocity)。

香港的機場多普勒天氣雷達作多仰角的掃瞄(0.6 度至 60 度)，以獲取機場附近地區的徑向風速和反射率(reflectivity)數據，它利用內置的電腦程式來計算

雷暴引致的風切變，包括微下擊暴流及颶鋒，然後自動發出警告。同時，機場預報員也會利用機場多普勒天氣雷達及其他儀器（例如風速表、風廓線儀等）來監測機場附近的低空風切變，發出風切變警告。

襲港颱風的啓示

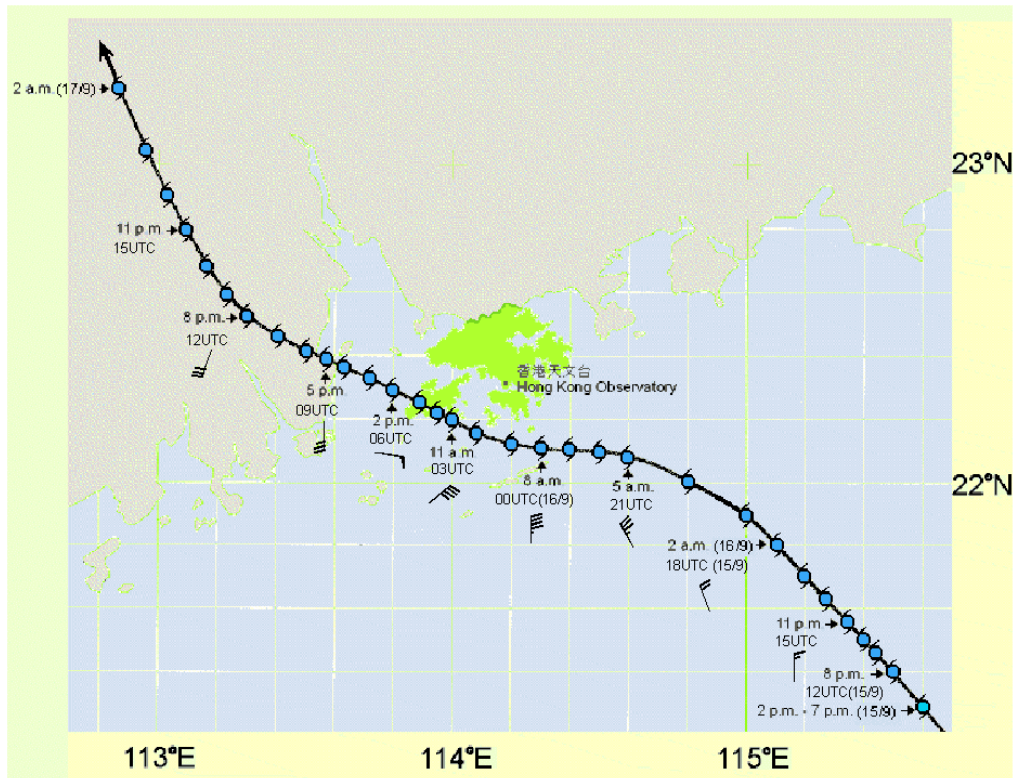
本文利用 1999 年 9 月一橫越大嶼山的熱帶氣旋—颱風約克(9915)，來說明由地形引致的風切變。首先，第二節描寫約克的移動路徑及香港國際機場的風場轉變，第三節則帶出在不同風向下影響機場的地形引致的低空風切變，最後一節是個案對機場風切變預報所帶來的啓示。

2. 颱風約克的路徑及相應在香港國際機場的風向變化

1999 年 9 月 12 日，一股熱帶低氣壓於馬尼拉東北約 420 公里處形成，並向西移動，橫過呂宋北部。當該熱帶低氣壓進入南海後，在 9 月 13 日即增強為一熱帶風暴，並命名為約克。在本港，一號戒備信號在 9 月 13 日上午 10 時 45 分懸掛。在 9 月 14 日約克增強為一強烈熱帶風暴，並沿西北方向移近廣東沿岸，香港的風勢開始增強，三號強風信號在 9 月 15 日上午 10 時 15 分懸掛，隨後約克繼續增強，晚上達至颱風強度。

在 9 月 16 日清晨，約克開始接近香港(見圖二)。本港在 9 月 16 日清晨 3 時 15 分懸掛八號西北烈風或暴風信號。這時香港普遍吹北風，隨後約克穩定向西北偏西移動，本地風勢迅速增強，九號烈風或暴風增強信號在上午 5 時 20 分懸掛，而十號颶風信號在上午 6 時 45 分懸掛。當約克在 9 月 16 日中午時分逐漸逼近赤鱗角時，機場附近的風向由北風轉為偏東風。約克在下午橫越大嶼山西南部，繼而進入珠江口，機場附近的風向則依次漸轉東南、南然後西南。機場錄得的最低氣壓及最高風力分別為 977.3 百帕斯卡及每小時 93 公里。最後約克於黃昏時分在珠海附近登陸並減弱為一強烈熱帶風暴。約克減弱後繼續向內陸推進，在 9 月 17 日迅速減弱為一低壓區。

由於 9 月 16 日當天由清晨 2 時 45 分至晚上 9 時 32 分沒有航班在香港國際機場升降，所以在這段時間內並無風切變的報告。但機場多普勒天氣雷達圖像能清楚顯示赤鱗角附近的山脊和山谷下游產生不同類型和程度的風切變，其中一些更可能影響機場升降區，以下是詳細情況。



圖二 約克(9915)的路徑圖，顯示每小時的中心位置。

在熱帶氣旋符號附近的風羽顯示每三小時在香港國際機場錄得的風向及風速。

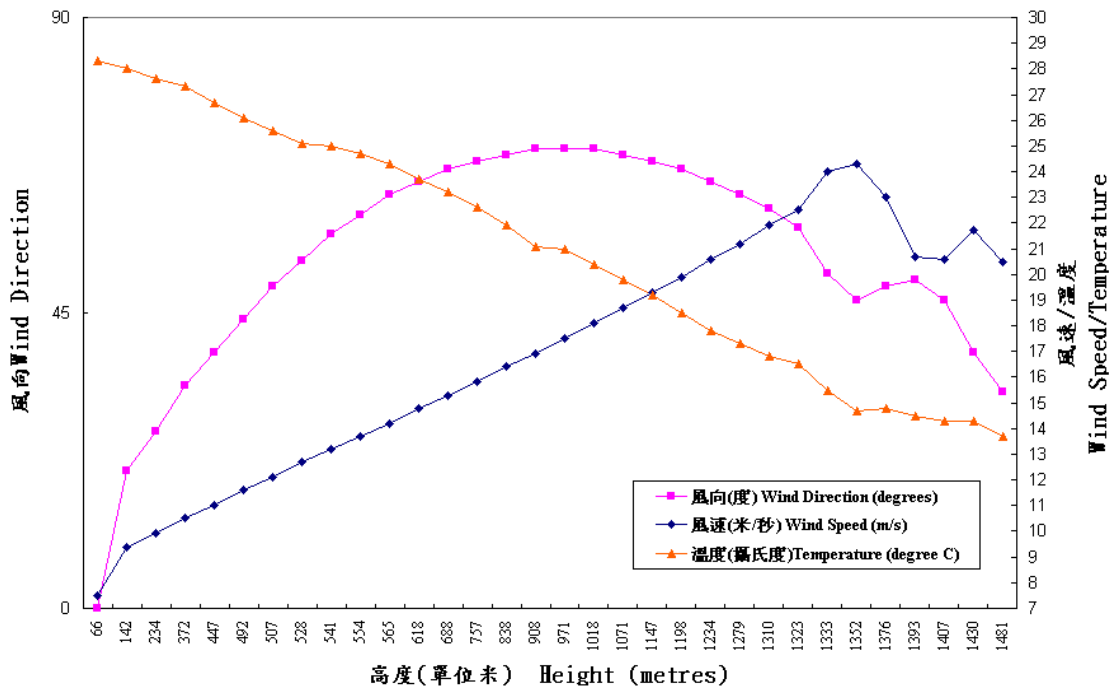
3. 地形引致的風切變

3.1 低空風為北風

在 1999 年 9 月 15 日本港時間下午 11 時 20 分，颱風約克集結於香港的東南面(見圖二)，香港正懸掛三號強風信號，當時香港國際機場的背景風主要為北風。從位於九龍半島天文台附近的京士柏高空氣象站(位置見圖三)錄得的高空探空資料(圖四)，可看到當時由近地面至 1000 米(即大嶼山附近山脈的高度，700 至 950 米) 以下皆為北至東北風 (360 至 070 度)。



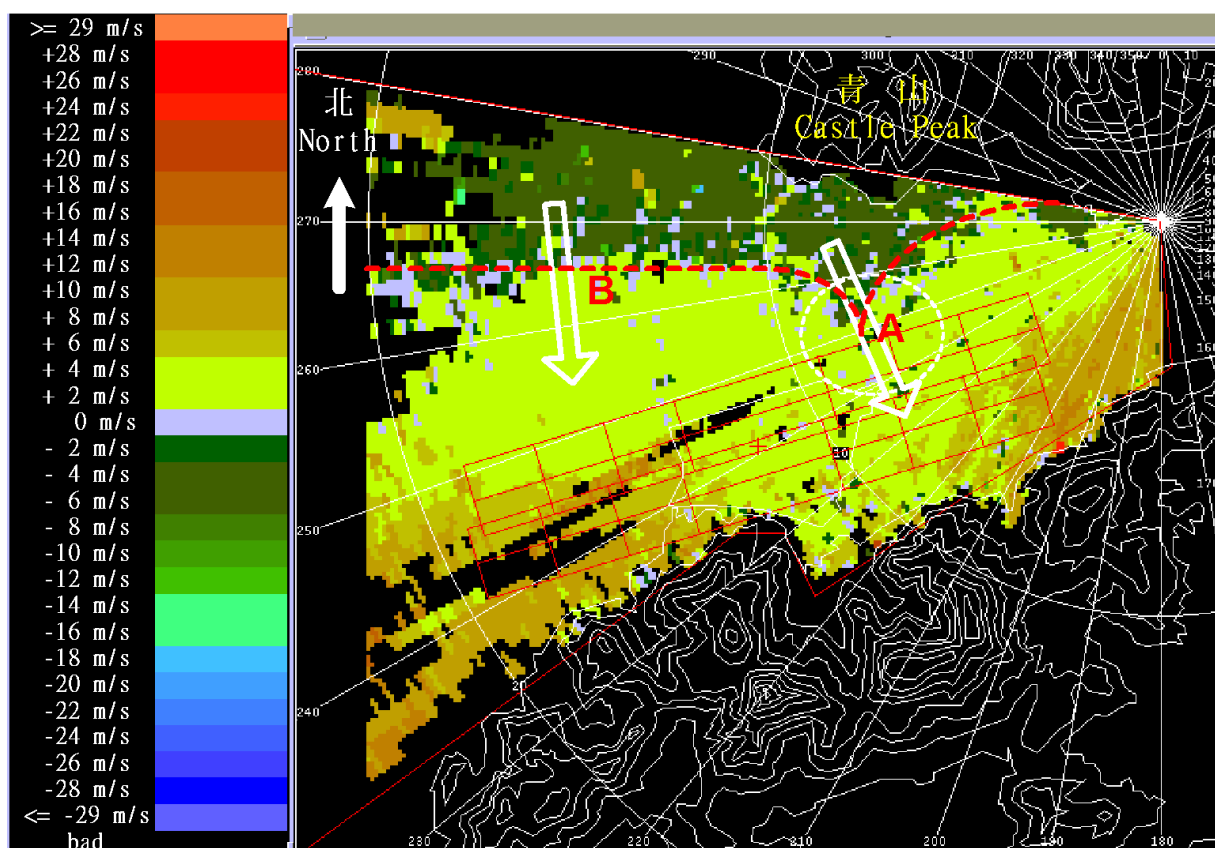
圖三 天文台京士柏高空氣象站位置圖（紅點所示）



圖四 1999年9月15日本港時間晚上8時的京士柏探空資料

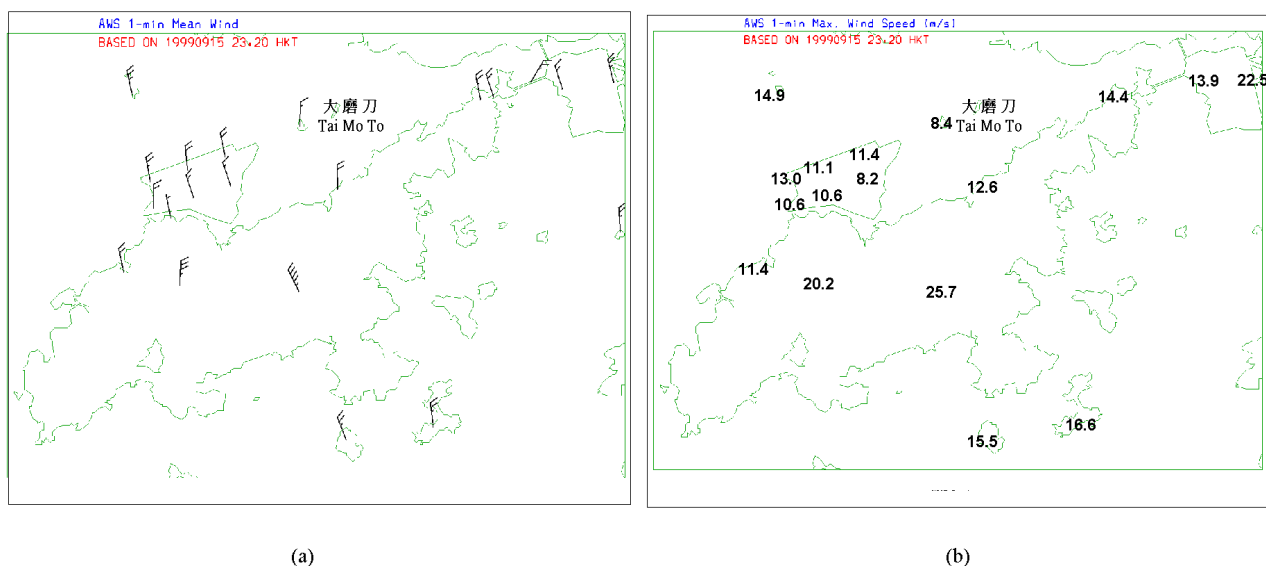
在偏北風情況下，赤鱗角處於青山的下游，北風繞過青山而轉向，在山的下游風向稍偏西北，這情況可從機場多普勒天氣雷達波浪形的零速度線得知。**圖五**是本港時間晚上 11 時 20 分機場多普勒天氣雷達最低仰角（0.6 度）掃描的徑向風速顯示，其中黃色區域是離開雷達的徑向風速、綠色區域是趨近雷達的徑向風速。圖中以紅色虛線勾畫的零速度線成 V 形，V 形的最南端（圖中標為 A 點）正位於青山下游，在 A 的風向約為 335，反觀零速度線的其他部份，例如遠離山脈下游的 B 點，風向則為約 355，顯示了氣流繞過青山後轉向了約 20 度。由於這個風向轉變，在 A 點附近產生了風切變，A 點剛觸及北跑道的升降區，由於香港國際機場的兩條跑道均與機場多普勒天氣雷達的徑向大致吻合，加上低仰角（0.6 度）的掃描在 A 區附近高度約 150 米，與航道高度相差不遠，因此我們可以利用雷達 0.6 度掃描的徑向風速來估計航道上的風切變。

在 A 點附近，白色虛線圓圈標誌著的區域的徑向風速介乎 +5 及 -4 米/秒（見**圖五**），這表示如飛機橫過該區域時將感受到約 9 米/秒的風切變，即逆風增加或減少 18 海浬/小時左右，屬強烈風切變（ ≥ 15 海浬/小時）。由於 A 點只僅僅觸及北跑道升降區，相信並未對飛機造成影響。



圖五：1999 年 9 月 15 本港時間晚上 11 時 20 分
機場多普勒天氣雷達 0.6 度 PPI 徑向風速顯示，圖中紅色方格為跑道升降區

圖六是晚上 11 時 20 分的風速表錄得的一分鐘平均風力，雖然風速表的覆蓋範圍及解像度遠遜機場多普勒天氣雷達，但圖中仍可見由於受山脈阻擋，青山下游的大磨刀風速表的風力及陣風也較附近的為小。



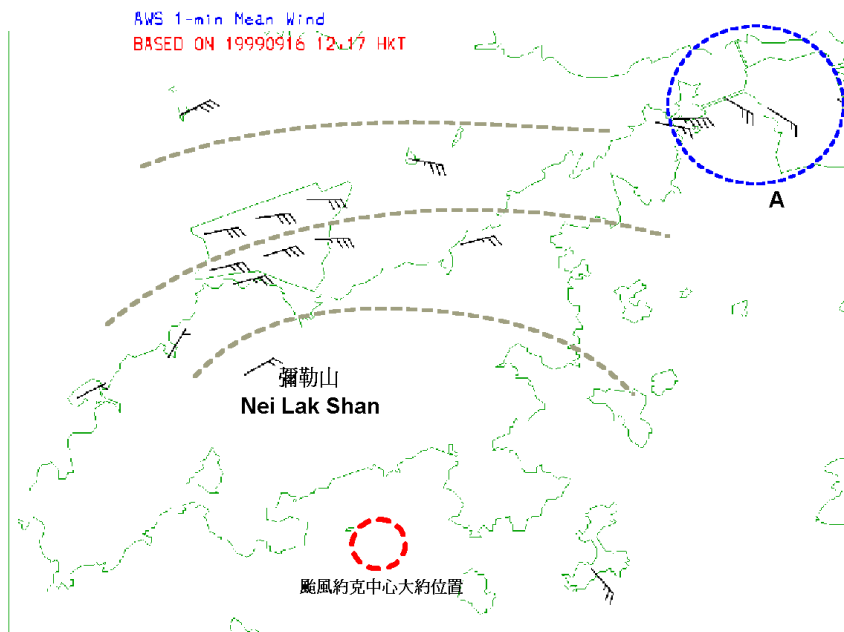
圖六：1999 年 9 月 15 日晚上 11 時 20 分大嶼山附近各風速表錄得的
(a)風向風速及(b)一分鐘最高陣風（單位米/秒）

3.2 低空風為偏東風

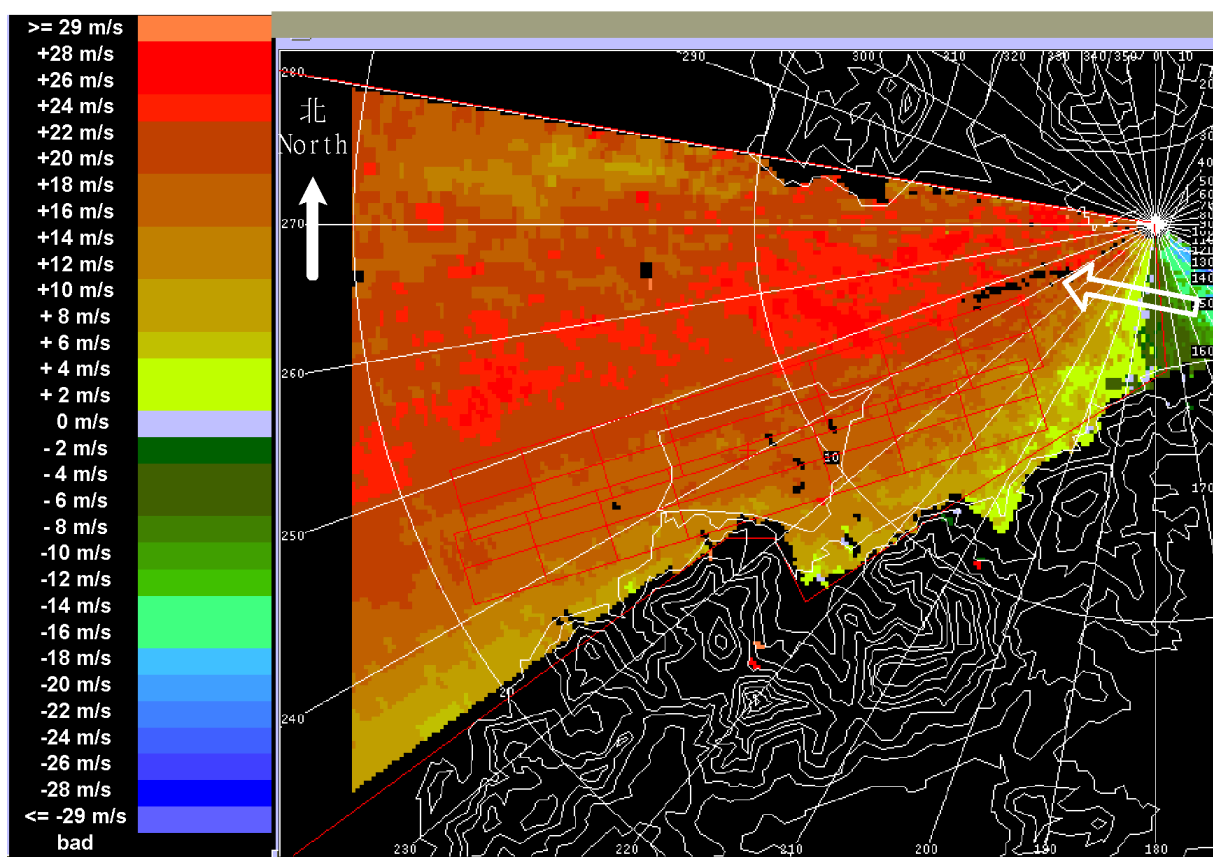
在翌日（1999 年 9 月 16 日）本港時間下午 12 時 17 分，颱風約克集結於赤鱸角的南面（見圖二），十分接近大嶼山南部，這時香港已懸掛十號颶風信號，香港國際機場的背景風主要為東風。

從圖七的風速表數據可見地面及彌勒山（約高 700 米）同為偏東風。

圖八是下午 12 時 17 分的機場多普勒天氣雷達 0.6 度 PPI 徑向風速顯示，從圖中幾近直線的零速度線估計風向約為 110，與圖七 A 區的風向大致吻合。圖八顯示升降區內並沒有明顯風切變。

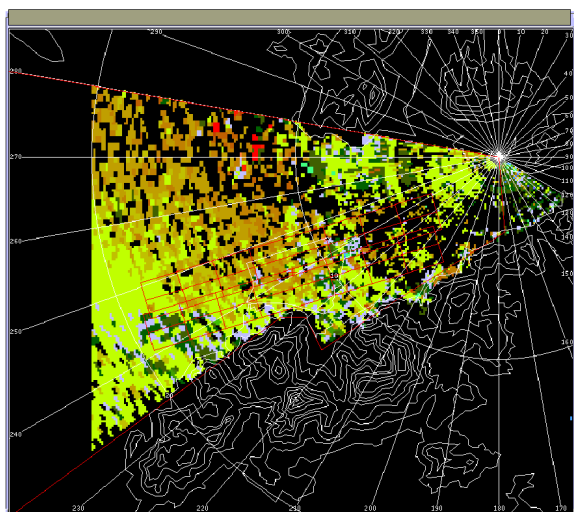


圖七：1999年9月16日下午12時17分大嶼山附近各風速表錄得的風向風速

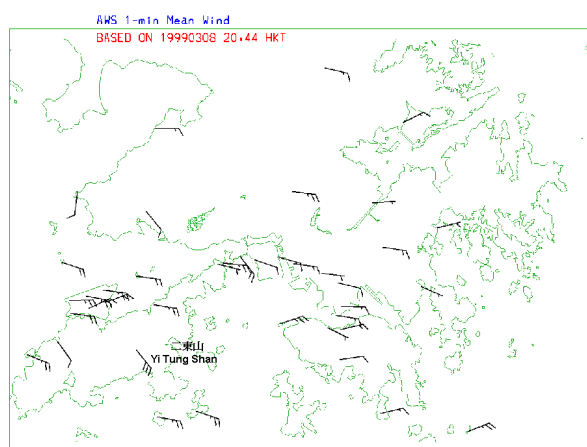


圖八：1999年9月16日下午12時17分
機場多普勒天氣雷達 0.6 度 PPI 徑向風速顯示

從圖七看到的東風成氣旋式流場（灰色虛線所示），機場附近的風有些微偏北分量，在這氣旋式東風流場影響下，升降區並非位於大嶼山主要山脈下游，因此由地形引致的風切變不明顯。這情況跟我們以往在東風影響下所出現的風切變情況不同。例如 1999 年 3 月 8 日晚上一次風切變個案中²，當時雷達圖像明顯看到跑道西面升降區的風切變區域（圖九）。從圖十可知當時地面雖然吹東風，但二東山（約 700 米）卻吹東南風，升降區位於大嶼山山脈的東南風下游，有地形引致的風切變。由於 1999 年 3 月 8 日的低空風配置跟約克的深厚（1000 米以下）東風有很大分別，後者沒有出現地形引致的風切變。



圖九



圖十

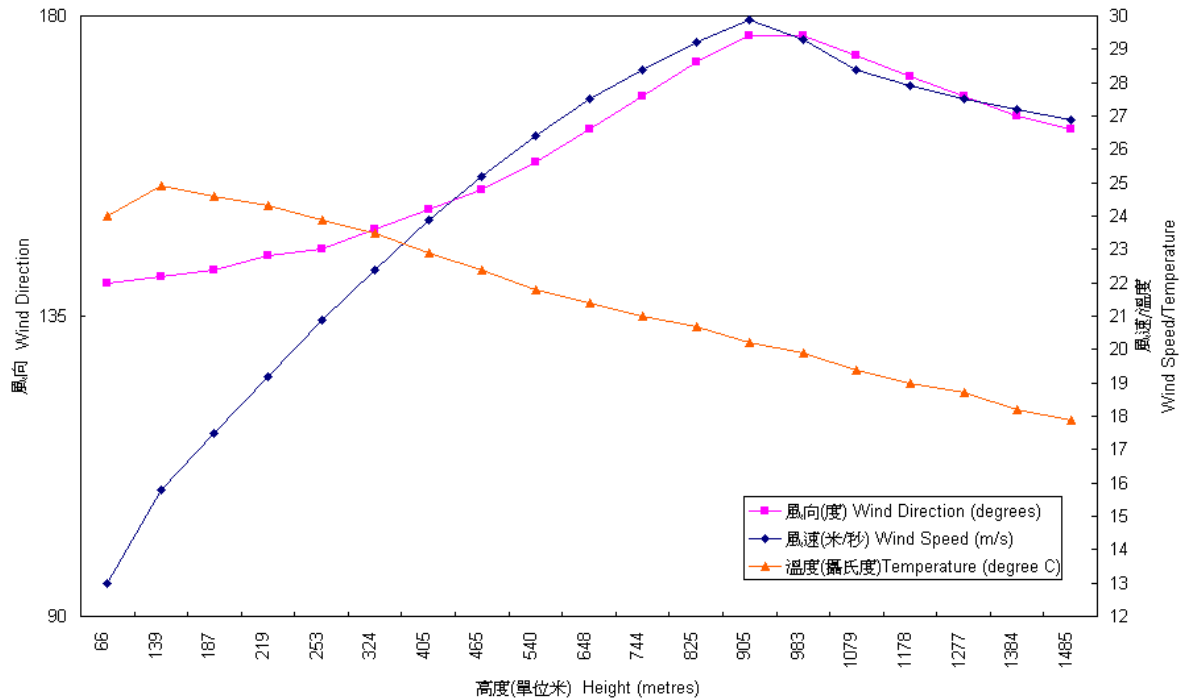
圖九：1999 年 3 月 8 日晚上 8 時 44 分機場多普勒天氣雷達 0.6 度 PPI 徑向風速顯示

圖十：同時間的本港各風速表錄得的風向風速

3.3 低空風為東南風

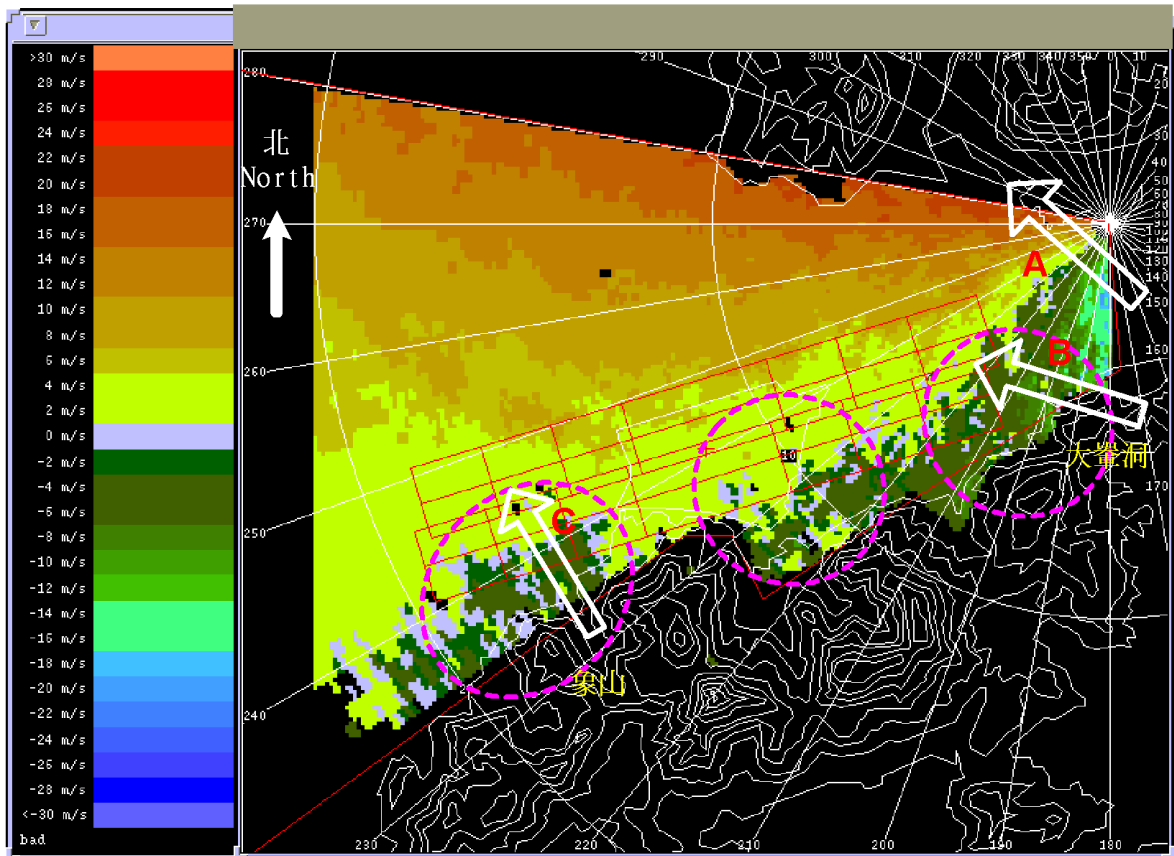
在 1999 年 9 月 16 日本港時間下午 1 時 59 分，颱風約克集結於赤鱓角的西面(見圖二)，這時香港仍然懸掛十號颶風信號，香港國際機場的背景風主要為東南風。

圖十一為 1999 年 9 月 16 日下午 2 時的探空資料，可看到當時由近地面至 1000 米皆為南至東南風（風向 140 至 180 度）。



圖十一：1999年9月16日下午2時分京士柏探空資料

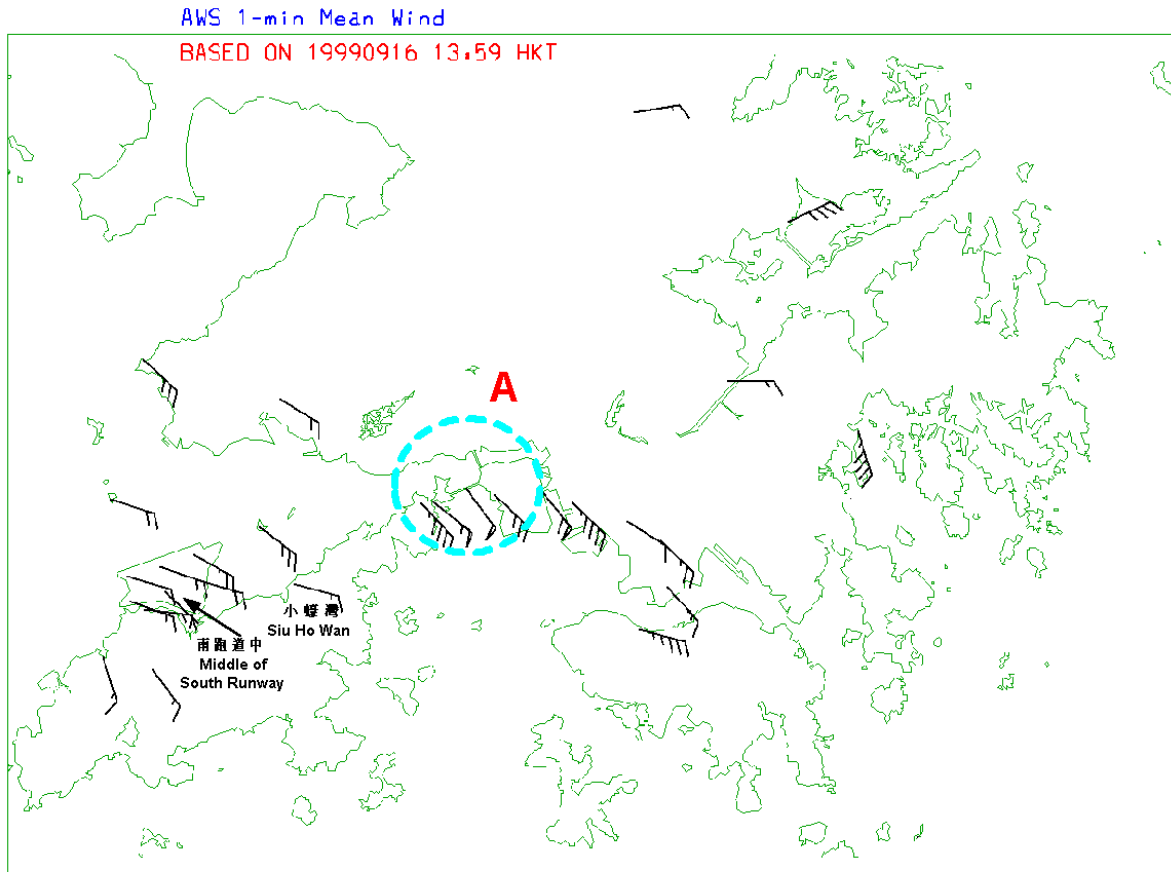
圖十二可以看到當時的機場多普勒天氣雷達 0.6 度徑向風速顯示，其時零速度線呈波浪及不規則形狀，從接近雷達的 A 區零速度線得知風向約為 130，與當時的背景風吻合(見圖十三 A 區附近風速表的風向)。可是另一方面，如觀察 0.6 度徑向風速時間序列動畫，便發現桃紅色虛線區域內有黃綠相間的小區，由東南向西北飄移，飄移方向大致跟背景的背景的東南風一致。近大嶼山北岸的 B 區風向約為 110，而 C 區風向則約為 150。B 區的黃色區域顯示風向較背景風偏東，而 C 區的綠色區域則顯示風向較背景風偏南。相信東南氣流繞過大嶼山的各山脊時，風向因地形產生變化，引致升降區出現細小範圍的擾動。



圖十二: 1999年9月16日下午1時59分
機場多普勒天氣雷達 0.6 度 PPI 徑向風速顯示

從圖十二可看到南跑道的升降區內的徑向風速介乎 +4 及 -4 米/秒，這表示如飛機橫過升降區時將感受到約 8 米/秒的強烈風切變，即逆風增加或減少 16 海浬/小時左右。

圖十三是下午 1 時 59 分時本港各風速表的一分鐘平均風力，可以看到機場南跑道正中位置及小蠔灣風速表的風向分別較背景風偏南和偏東，與雷達顯示相符，即氣流繞過山脊後轉向。

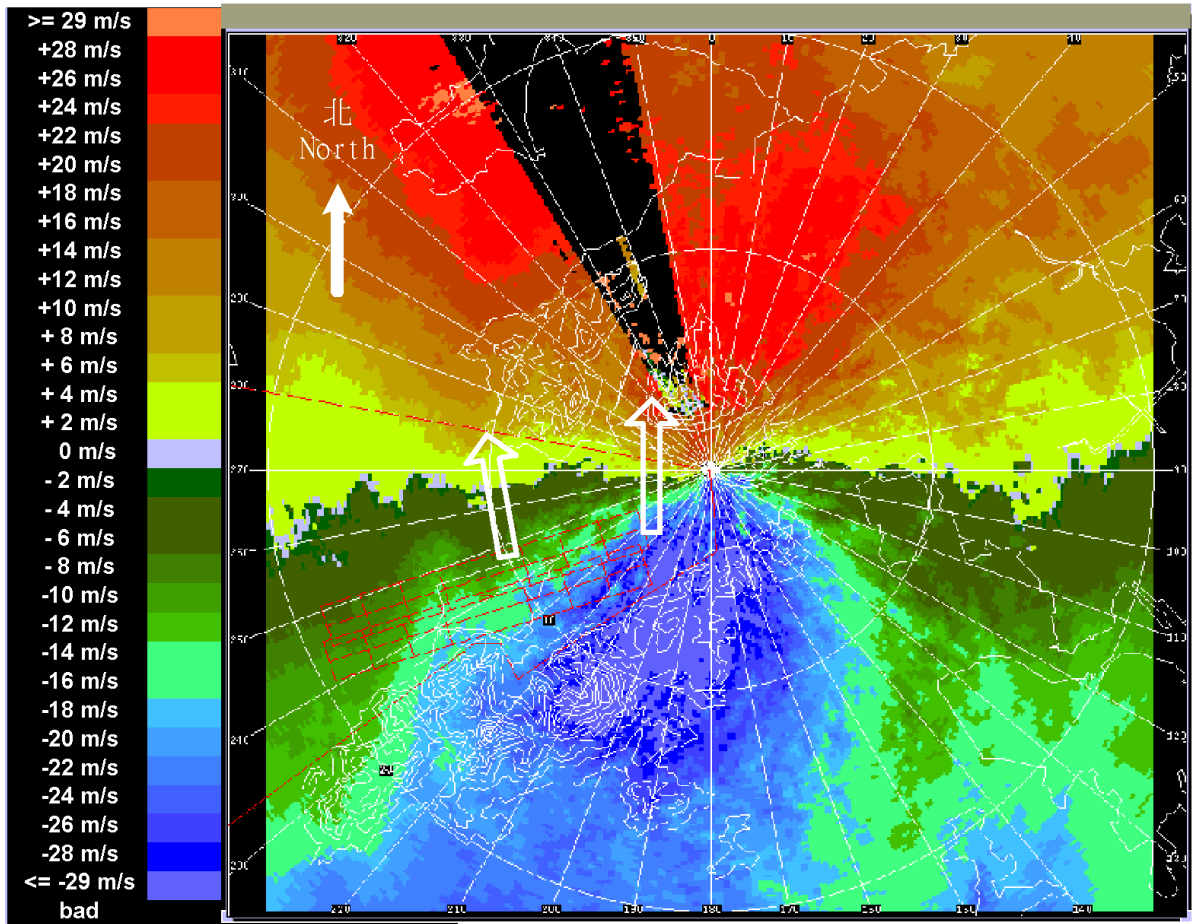


圖十三: 1999年9月16日下午1時59分本港各風速表的一分鐘平均風向風速

3.4 南風/西南風

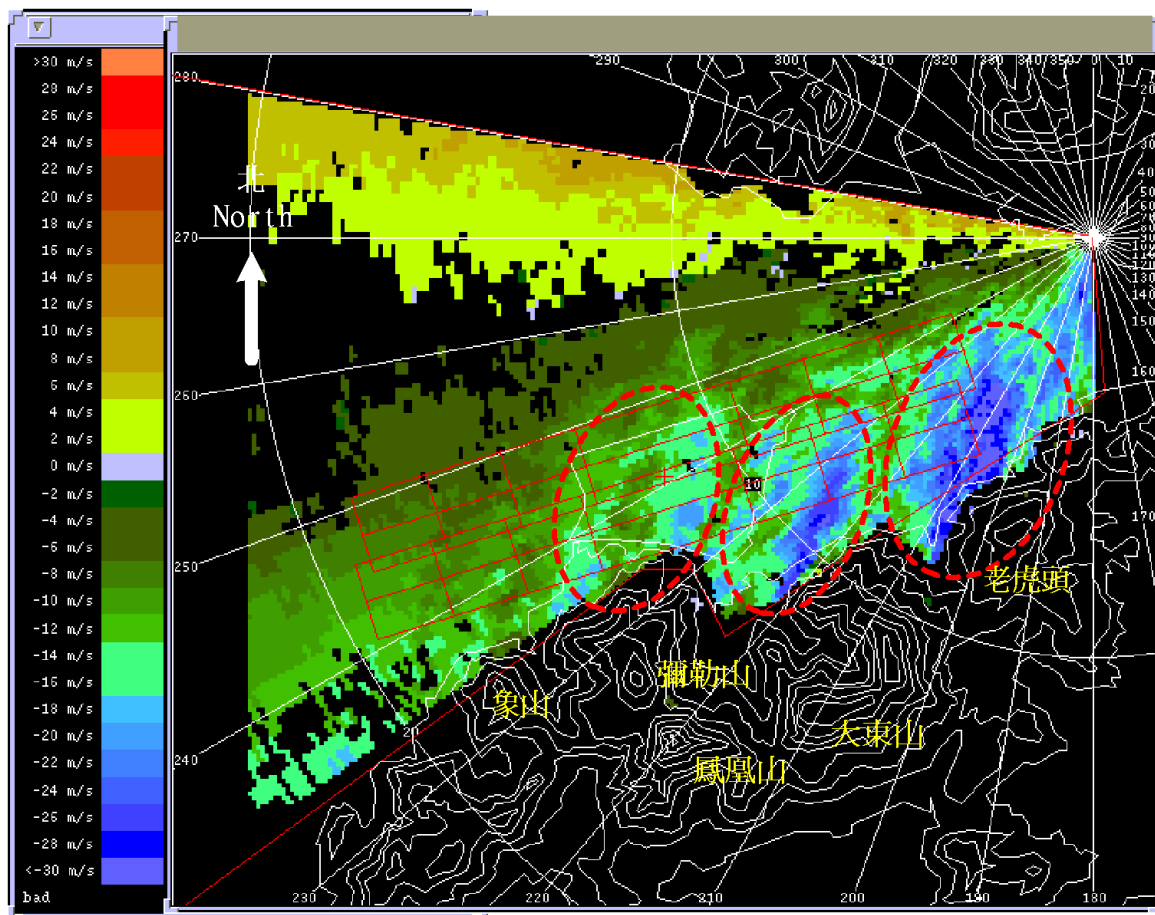
在9月16日下午3時59分，颱風約克集結於赤鱓角的西北偏西(見圖二)，這時香港仍然懸掛十號颶風信號，香港國際機場的背景風主要為偏南風。

圖十四是下午4時01分的機場多普勒天氣雷達6.0度徑向風速顯示，圖中可看接近雷達的零速度線只是稍微成波浪形，由此可推斷當時雷達附近、近地面至1000米高度的風向約為175至180(白色箭頭)，風向大致為南風。



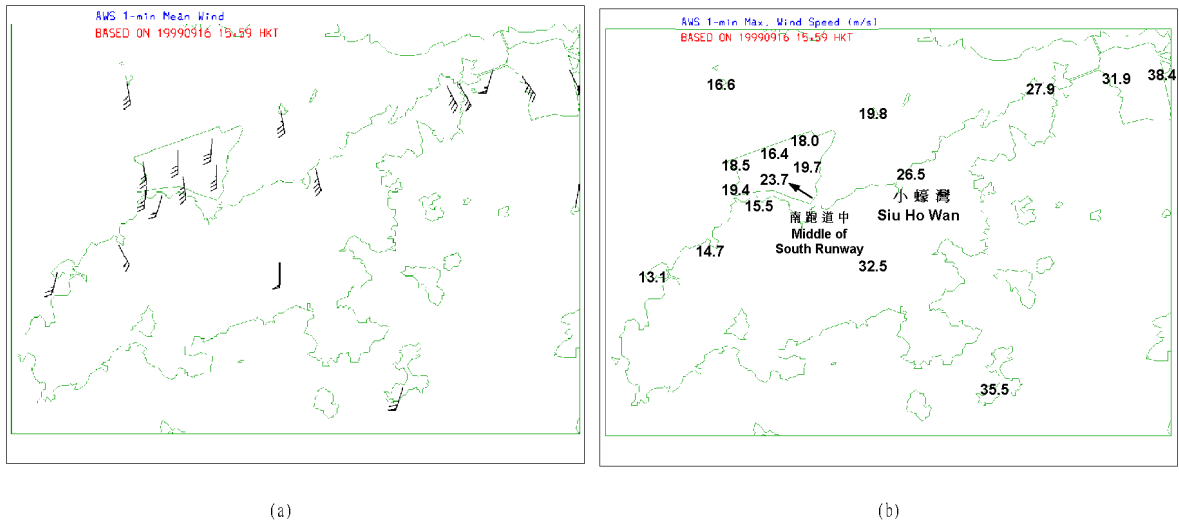
圖十四 1999年9月16日下午4時01分
機場多普勒天氣雷達 6.0 度 PPI 徑向風速顯示

當南風被大嶼山的山脈阻擋時，氣流從山谷中穿過。圖十五為9月16日下午3時59分的機場多普勒天氣雷達0.6度徑向風速顯示，圖中可見數條（紅色虛線所示）高速氣流，其徑向風速(深藍色、趨向雷達)可超過-28米/秒，急流的方向跟背景風接近，相信是背景氣流衝過象山、彌勒山、鳳凰山、大東山和老虎頭之間的山谷時產生的。由於山谷的高度有350米至450米，而雷達圖像中紅色虛線所示區域的高度只有120至200米，所以急流可能是從較高位置下沉而來。紅色虛線所示區域正位於南北跑道東面的升降區，區內的徑向風速介乎-8及-30米/秒，這表示如飛機橫過紅色區域時將感受到最大為22米/秒的猛烈風切變(≥ 30 海浬/小時)，即逆風增加或減少約44海浬/小時。由於急流伸展範圍覆蓋南跑道多於北跑道，相信前者更受這類風切變影響。



圖十五: 1999年9月16日下午3時59分
機場多普勒天氣雷達 0.6度 PPI 徑向風速顯示

圖十六為同一時間的自動氣象站一分鐘平均風力，當時的背景風大約祇有15至20米/秒，而南跑道中及小蠔灣錄得的一分鐘最高陣風為23.7及26.6米/秒，與雷達顯示的急流強度相若。

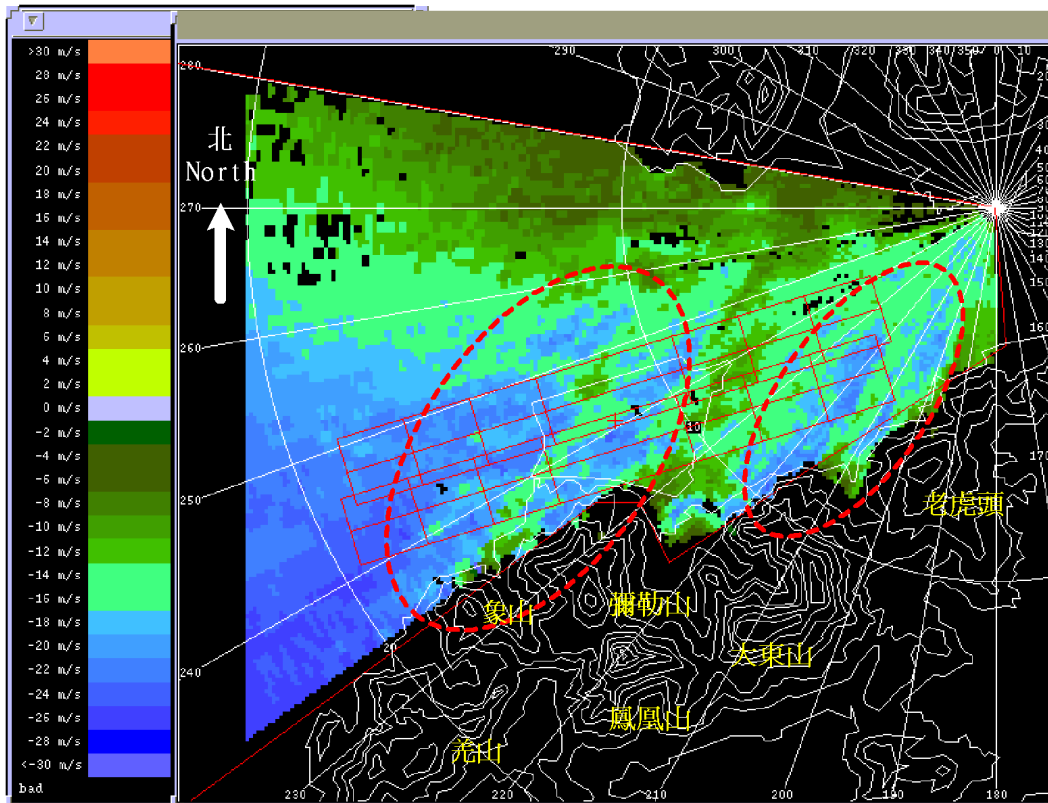


圖十六：1999年9月16日下午3時59分大嶼山附近各風速表錄得的
(a)風向風速及(b)一分鐘最高陣風（單位米/秒）

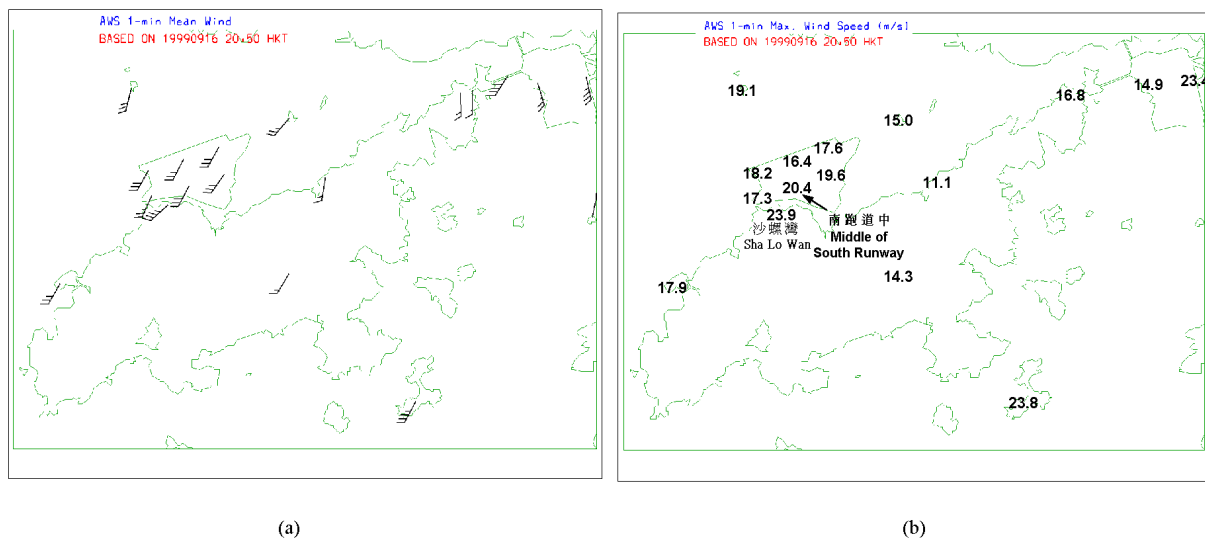
上述急流至晚上8時50分仍然存在(圖十七)，但強度已減弱。當時赤鱗角的風轉為較偏向西南(圖十八)，探空資料(圖十九)也顯示從近地面至1000米大致為南至西南風（180至220度）。

從圖十七可見紅色虛線所示之急流成東北西南走向，跟背景風近乎平行；急流的最高徑向風速約-20至-23米/秒（趨向雷達），這與南跑道中及沙螺灣風速表錄得的一分鐘最高陣風20.4及23.9米/秒十分吻合。相信這些急流也跟南風的情形一樣，是背景氣流衝過羌山、象山、彌勒山、鳳凰山、大東山和老虎頭等複雜地形時產生的。

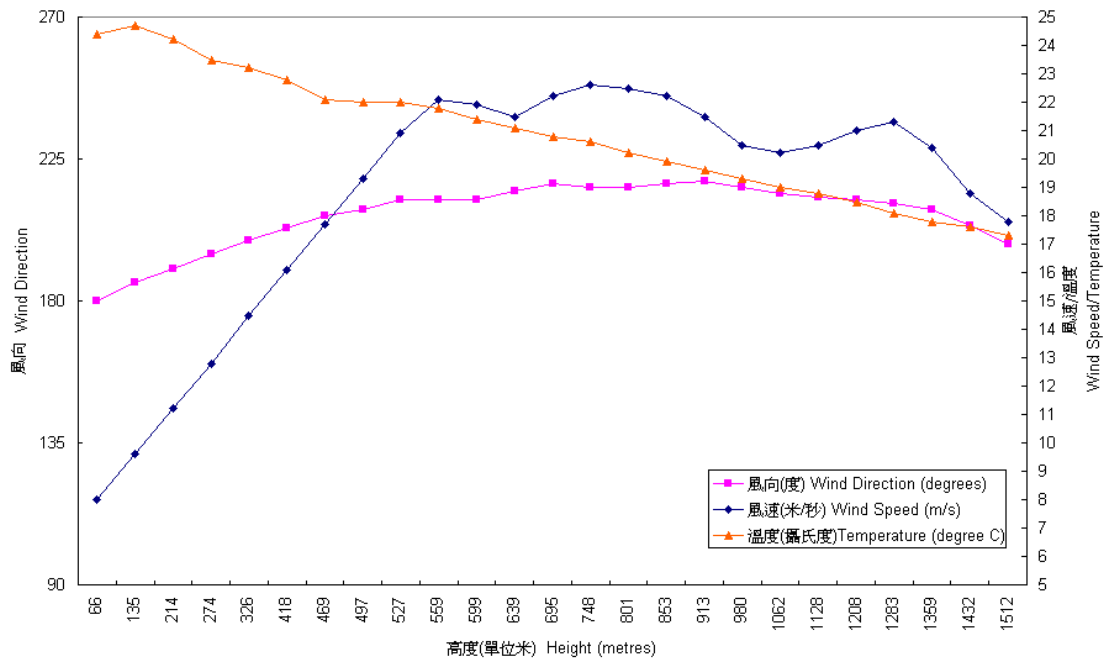
圖十七中紅色虛線所示區域內的徑向風速介乎-8及-23米/秒，這表示如飛機橫過升降區時將感受到最大為15米/秒的猛烈風切變，即逆風增加或減少30海浬/小時左右。與南風的情況相類似，急流伸展範圍覆蓋南跑道多於北跑道，所以前者更受這類風切變影響。



圖十七: 1999年9月16日晚上8時50分
機場多普勒天氣雷達 0.6 度 PPI 徑向風速顯示

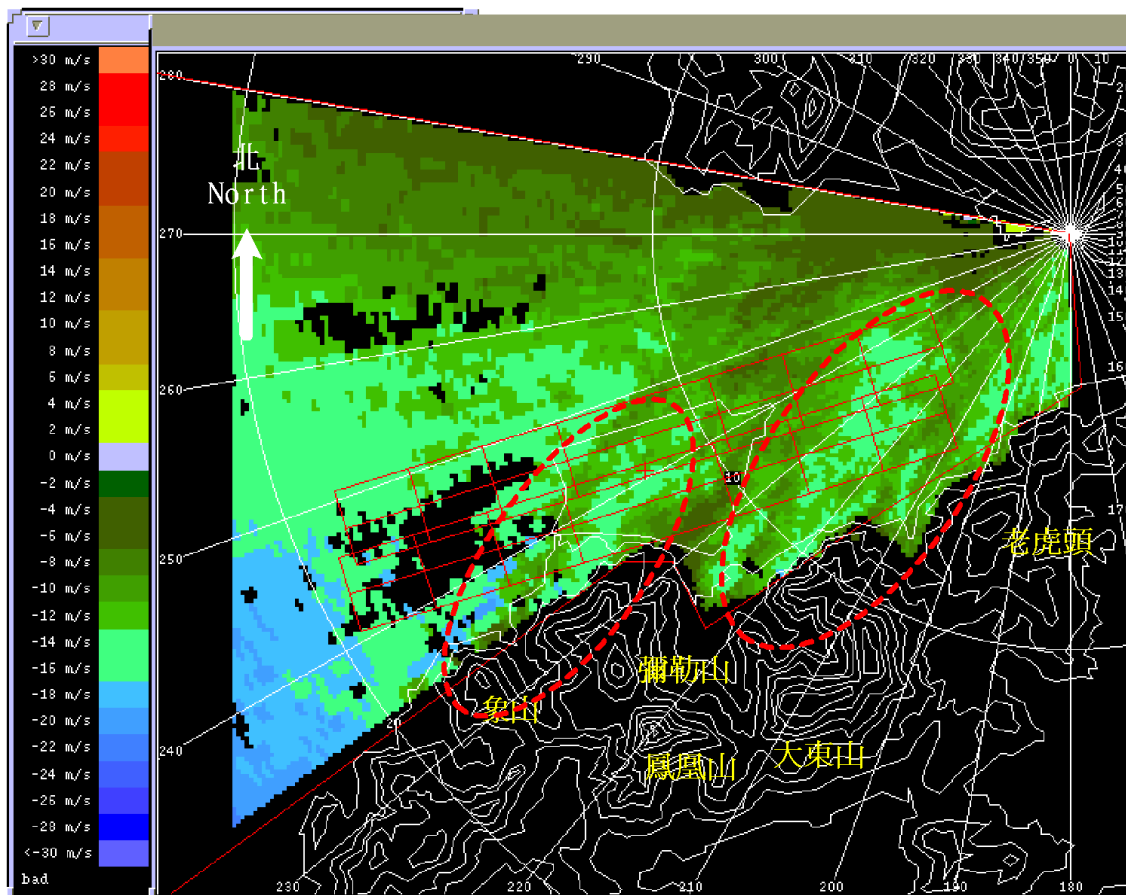


圖十八：1999年9月16日晚上8時50分大嶼山附近各風速表錄得的
(a)風向風速及(b)一分鐘最高陣風（單位米/秒）



圖十九：1999年9月16日晚上8時京士柏探空資料

當航班在晚上9時32分恢復在機場升降後，西南急流明顯減弱(見圖二十)，圖中機場及東面升降區域內的徑向風速介乎-14及-8米/秒，這表示如飛機橫過東面升降區時將感受到最大只有6米/秒的風切變，即逆風增加或減少12海浬/小時左右。由於風切變微弱，對飛機沒有很大影響，因此沒有收到飛機風切變報告。



圖二十: 1999年9月16日晚上9時53分
機場多普勒天氣雷達 0.6 度 PPI 徑向風速顯示

4. 颱風約克對風切變預報的啓示

從颱風約克橫越大嶼山的整個過程，顯示在惡劣天氣、有足夠雷達回波的情況下，機場多普勒天氣雷達具備量度風切變情報的能力。我們在以下歸納了一些在熱帶氣旋影響下有關地形引致風切變的特性：

- 4.1. 當背景風為北風，由於赤鱓角與北面的青山有一段距離，所以地形帶來的風切變影響升降區的機會不高；
- 4.2. 當背景風為深厚的東風，並有一些北分量，由於赤鱓角東面沒有高山阻擋，因此在這情況下並沒發現地形引致的風切變。這跟其他地面為東風，但高空為東南風的情況有顯著不同。地形引致的風切變出現與否，其中主要決定性因素為低空氣流必須具備橫越山脈的分量。

- 4.3. 當背景風為東南/南/西南風，風繞過大嶼山山脊轉向或穿越複雜地形後形成細小範圍的擾動或明顯的急流，為跑道升降區帶來風切變。在颱風維克托（1997年8月2日）及颱風瑪姬（1999年6月7日）影響下類似的風切變也有出現³。
- 4.4. 在背景為南/西南風的情況下，除了利用機場多普勒天氣雷達來監測急流外，風速表數據如一分鐘最高陣風也可用作客觀的監測指標。
- 4.5. 由於東南/南/西南風情況下南跑道較北跑道接近大嶼山，前者受地形引致風切變影響的機會較大。

參考文獻：

C.M. Shun and Olivia S.M. Lee , “Optimization of the Terminal Doppler Weather Radar for the Hong Kong International Airport”, *Proceedings of International Symposium on Electronics in the Air Transport Industry 98*, pp. 57-80, 1998.

S.Y. Lau and C.M. Shun, “Observation of Terrain-induced Windshear around Hong Kong International Airport under Stably Stratified Conditions”, *Proceedings of the Ninth Conference on Mountain Meteorology*, pp. 93-98, 2000.

C.M. Shun and S.Y. Lau , “Terminal Doppler Weather Radar (TDWR) Observation of Atmospheric flow over Complex Terrain during Tropical Cyclone Passages”, *Proceedings of Conference on Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment II*, pp. 42-53, 2000.