

Reprint 865

利用雷達多普勒風估算熱帶氣旋的地面風力分佈

李淑明

第二十四屆粵港澳氣象科技研討會

深圳，2010 年 1 月 20-22 日

利用雷達多普勒風估算熱帶氣旋的地面風力分佈

李淑明
香港天文台

摘要

當熱帶氣旋進入天文台多普勒天氣雷達的探測範圍時，雷達的多普勒徑向風速成為估算熱帶氣旋的風力與強度的重要觀測資料。由於位於大帽山的天氣雷達的高度離海平面約一公里，縱使參考零度仰角的水平掃描，雷達徑向風速也只表示離地一公里或以上的風力，而非地面的風力。為了找出多普勒風跟地面風的關係，我們選取了 1999 至 2008 年為香港帶來地面強風或以上風力的熱帶氣旋個案，分析了地面風與雷達的徑向風速的相關情況。由於雷達的徑向風探測範圍較廣，覆蓋廣東沿海地區，所以藉著地面風與雷達徑向風速的相關，可以估算熱帶氣旋的地面風力分佈及強度。

分析顯示，利用最小平方法計算出來的迴歸直線公式，得出地面風速跟一公里高徑向風速的比例約為 0.7。本文將介紹相關分析過程、展示結果及討論如何將結果應用於業務上。

1. 引言

香港天文台在1999年在大帽山頂裝置了一台遠程天氣雷達，主要用作公眾天氣服務。它是波長為10公分的S-波段脈衝多普勒天氣雷達，雷達每6分鐘進行一次從仰角0度至34度的PPI體積掃描，大帽山天氣雷達位置見圖一。

天文台利用大帽山天氣雷達來監察熱帶氣旋和暴雨，其中雷達多普勒風場對估計颱風強度十分有用。但由於大帽山天氣雷達的天線高度離海平面約1公里，縱使參考最低仰角0度的水平PPI掃描，其多普勒風也只表示離地面約1公里的風力，而非地面的風力，因此我們希望利用迴歸分析來找出地面風跟雷達0度PPI多普勒風的比例，讓我們可利用雷達多普勒風來估計熱帶氣旋帶來的地面風力。

2. 數據

我們選取了1999至2008年間，橫瀾風速表(位置見圖一)10分鐘平均風速達強風或以上風力(即大於11.5 m/s)的熱帶氣旋個案，分析大帽山天氣雷達最低仰角(0度)的多普勒風數據和對應時間的橫瀾風速表10分鐘平均風速資料，以此找出地面風力與一公里高風力的比例 f 。上述期間共有16個熱帶氣旋個案。我們選用橫瀾的數據是因為橫瀾的風速表位於一個四面沒有阻擋的小島上，較好反影香港背景風的情況。

3. 方法

3.1 方法一

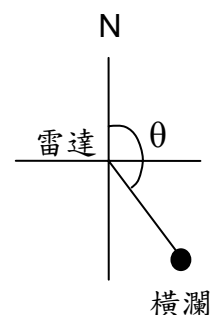
推導 f 的方法如下：

$f = \text{橫瀾風速表風速} / \text{對應1公里高的風速}$

最初，我們假設橫瀾風向跟1公里高的風向是相同的，

以此推斷：

$S_A = \text{橫瀾風速表10分鐘平均風速(m/s)}$



D_A = 橫瀾風速表 10 分鐘平均風向(degree)

S_1 = 橫瀾位置 1 公里高風速(m/s)

D_1 = 橫瀾位置 1 公里高風向(degree) = D_A (假設；見下段討論)

θ = 橫瀾風速表對應大帽山天氣雷達之方位角(degree) (見上圖)

V_A = 橫瀾風速表 10 分鐘平均風速對應大帽山天氣雷達之徑向分量
= $-S_A \cos(D_A - \theta)$ (1)

V_d = 對應橫瀾風速表位置之大帽山天氣雷達 0 度仰角 PPI 徑向風速 (約 1 公里高)
= $-S_1 \cos(D_A - \theta)$ (2)

$f = S_A / S_1$ (3)

從 (3) 得出: $S_1 = S_A / f$ (4)

將 (4) 放進 (2):

$V_d = -(S_A / f) \cos(D_A - \theta)$

$f V_d = -S_A \cos(D_A - \theta) = V_A$

因此在 $y = V_A$ 、 $x = V_d$ 的 xy 散佈圖上利用最小平方法計算出來的迴歸分析，得出的迴歸直線的斜度便是 f ，而迴歸直線應通過坐標軸中心。

可是，初步結果顯示，迴歸直線並沒有通過坐標軸中心， y 截距大至 10 m/s，而 f 則大於 1！（見圖二 — 強烈熱帶風暴北冕的 xy 散佈圖及線性迴歸分析結果）。

引致這不大合理結果的原因可能由於 D_A （橫瀾風速表 10 分鐘平均風向）不等於 D_1 （對應橫瀾位置 1 公里高風向）。

3.2 方法二

我們嘗試用另一方法來估算對應橫瀾位置 1 公里高風向 — 設 D_1 為深水埗風廓線儀 1 公里高的風向。深水埗風廓線儀位置見圖一。

我們將大帽山天氣雷達 0 度仰角 PPI 多普勒零速線指示的方向分別跟深水埗風廓線儀 1 公里高的風向和橫瀾風向作比較，顯示風廓線儀的風向跟多普勒風場顯示的風向較接近（見圖三），所以選用 $D_1 =$ 深水埗風廓線儀 1 公里高的風向來推導 f 較合理：

$$f = S_A / S_1 \quad (a)$$

$S_A =$ 橫瀾風速表 10 分鐘平均風速(m/s)

$S_1 =$ 橫瀾位置 1 公里高風速(m/s)

$D_1 =$ 橫瀾位置 1 公里高風向 = 深水埗風廓線儀 1 公里高風向(degree)

$\theta =$ 橫瀾風速表對應大帽山天氣雷達之方位角(degree)

$V_d =$ 對應橫瀾風速表位置之大帽山天氣雷達 0 度仰角 PPI 徑向風速 (約 1 公里高)

$$V_d = - S_1 \cos(D_1 - \theta) \quad (b)$$

從 (a) 得出: $S_1 = S_A / f \quad (c)$

將(c) 放進(b):

$$V_d = - (S_A / f) \cos(D_1 - \theta)$$

$$f V_d = - S_A \cos(D_1 - \theta)$$

因此在 $y = - S_A \cos(D_1 - \theta)$ 、 $x = V_d$ 的 xy 散佈圖上利用最小平方法計算出來的迴歸分析，得出的迴歸直線的斜度應是 f ，而迴歸直線應通過坐標軸中心。

圖四是依方法二製作的強烈熱帶風暴北冕的 xy 散佈圖及線性迴歸分析結果，顯示迴歸直線幾乎通過坐標軸中心， y 截距非常接近 0。由此可知方法二的結果較為合理。

4. 結果

我們利用方法二對前述 16 個熱帶氣旋個案作迴歸分析，附錄一表列了所有

個案的 f 、迴歸直線方程及 R^2 值，相關的 xy 散佈圖則在附錄二。

從附錄一的線性迴歸分析數據顯示，個別熱帶氣旋個案的迴歸直線並不通過 xy 坐標軸中心， R^2 值也不高，主要由於這些熱帶氣旋的外圍雨帶較弱，以致多普勒速度數據的覆蓋範圍不大，而多普勒速度數據的噪聲亦較大，令迴歸分析不大準確。

為了提高計算 f 值的信賴度，我們剔除了 R^2 值少於 0.6 的個案，綜合 R^2 值大於或等於 0.6 的 10 個個案的 f 平均值，得出：

f 平均數 = 0.7

f 標準差 = 0.2

f 平均數的 95% 信賴區間=0.1

f 的平均數介乎 0.6 與 0.8

即：

f 的 95% 信賴區間介乎 0.6 至 0.8， f 約為 0.7。

5. f 在熱帶氣旋預報的業務應用

5.1 估計熱帶氣旋的烈風半徑

我們利用 $f \sim 0.7$ 和大帽山天氣雷達 0 度仰角 PPI 徑向風速資料來估計熱帶氣旋的烈風半徑。大帽山天氣雷達軟件 Interactive Radar Information System (IRIS) [1] 備有產品‘WARN’，只需列明條件，‘WARN’便能夠以橢圓圈出徑向風速大於某風速的區域。為了圈出地面烈風區域，我們定義了以下的條件：

(i) 1 公里高度徑向風速大於 V

($fV = 17.5 \text{ m/s}$ (地面烈風)，即 $V = 17.5 \text{ m/s} / 0.7 = 25 \text{ m/s}$)

(ii) 圈出區域面積大於 50 平方米

(iii) ‘WARN’橢圓標記: SG，即從雷達多普勒風推算的地面烈風(Surface Gales)

圖五是颱風莫拉菲趨近香港時，大帽山天氣雷達 0 度仰角 PPI 徑向風速圖像，時間是 2009 年 7 月 18 日 21:00 時。圖中加上了地面烈風(SG) 橢圓，顯示烈風半徑約為 120 公里。將此烈風半徑用於莫拉菲的移動路徑(圖六 a) 上，估計橫瀾風力達烈風程度的時間為 2009 年 7 月 18 日 22:30 時，跟實際達烈風時間 00:30 時(圖六 b)頗接近。

5.2 估計熱帶氣旋的中心風力

f 和大帽山天氣雷達 0 度仰角 PPI 徑向風速資料也可用來估計熱帶氣旋的中心風力。圖七顯示莫拉菲中心附近的最高徑向風速為折疊速度+39.77 m/s，而實際徑向風速則為-52.03 m/s，即估計地面最高風速為 $52.03 \text{ m/s} \times f = 52.03 \text{ m/s} \times 0.7 = 36.4 \text{ m/s}$ (71 knots)。這跟後來分析的中心風力 65 knots 相近。

6. 總結

從迴歸分析得出的地面風速跟一公里高風速比例 f，配合大帽山天氣雷達 0 度仰角 PPI 徑向風速圖，可用以估計熱帶氣旋的地面風力分佈和中心風力，這對預報熱帶氣旋帶來的大風很有幫助。

在應用這次分析結果時有些地方要注意，首先，從附錄一中剔除了 R^2 值少於 0.6 的個案後，我們只有 10 個個案來計算 f 平均值，由於個案不算多，得出的 f 平均值未必能涵蓋所有熱帶氣旋情況，但在業務應用時使用一個 f 值確實比較方便，所以在實際應用時可參考其他資料來估計熱帶氣旋風力。最近，我們優化了大帽山天氣雷達的掃描策略，令多普勒速度數據噪聲大幅減少，相信在未來日子我們可以有更多質量高的多普勒速度數據來計算 f 平均值，增加其準確性。

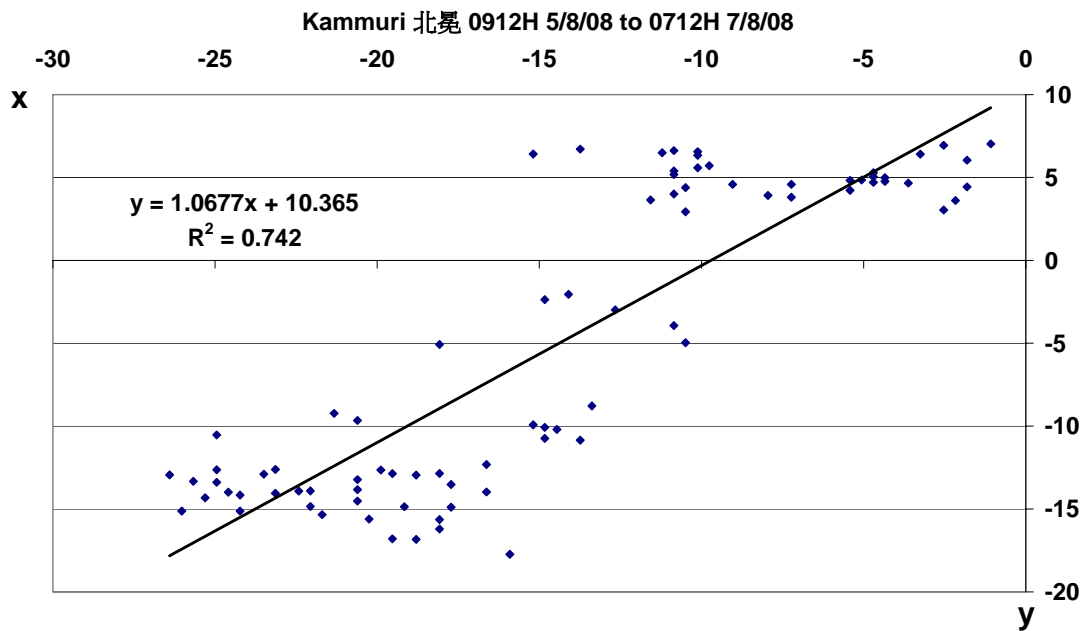
另外，有些熱帶氣旋外圍雨帶覆蓋範圍可能較小，導致 0 度仰角 PPI 徑向風速資料不足以推斷烈風半徑或中心附近最大風力，如遇上這情況，要借助其他資料來估計熱帶氣旋風力分佈。

參考文獻

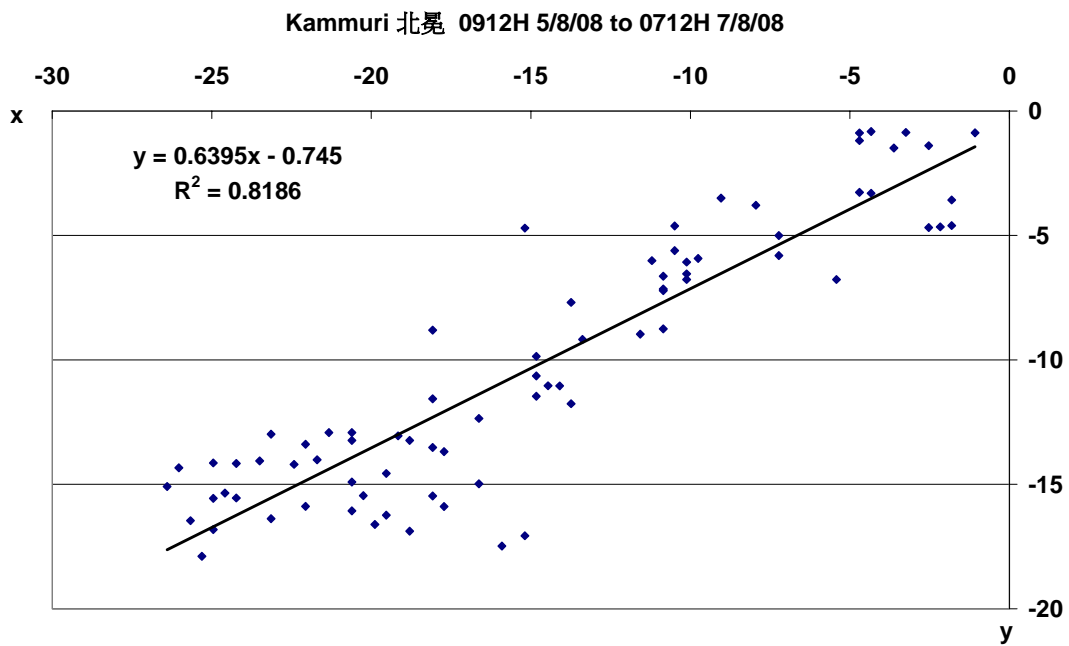
[1] SIGMET, Inc., 2008: IRIS Product & Display Manual, Section 2.20.



圖一 大帽山天氣雷達、橫瀾風速表及深水埗風廓線儀位置圖



圖二 強烈熱帶風暴北冕的 xy 散佈圖，y = 橫瀾風速表 10 分鐘平均風速對應大帽山天氣雷達之徑向分量，x = 對應橫瀾風速表位置之大帽山天氣雷達 0 度仰角 PPI 徑向風速。



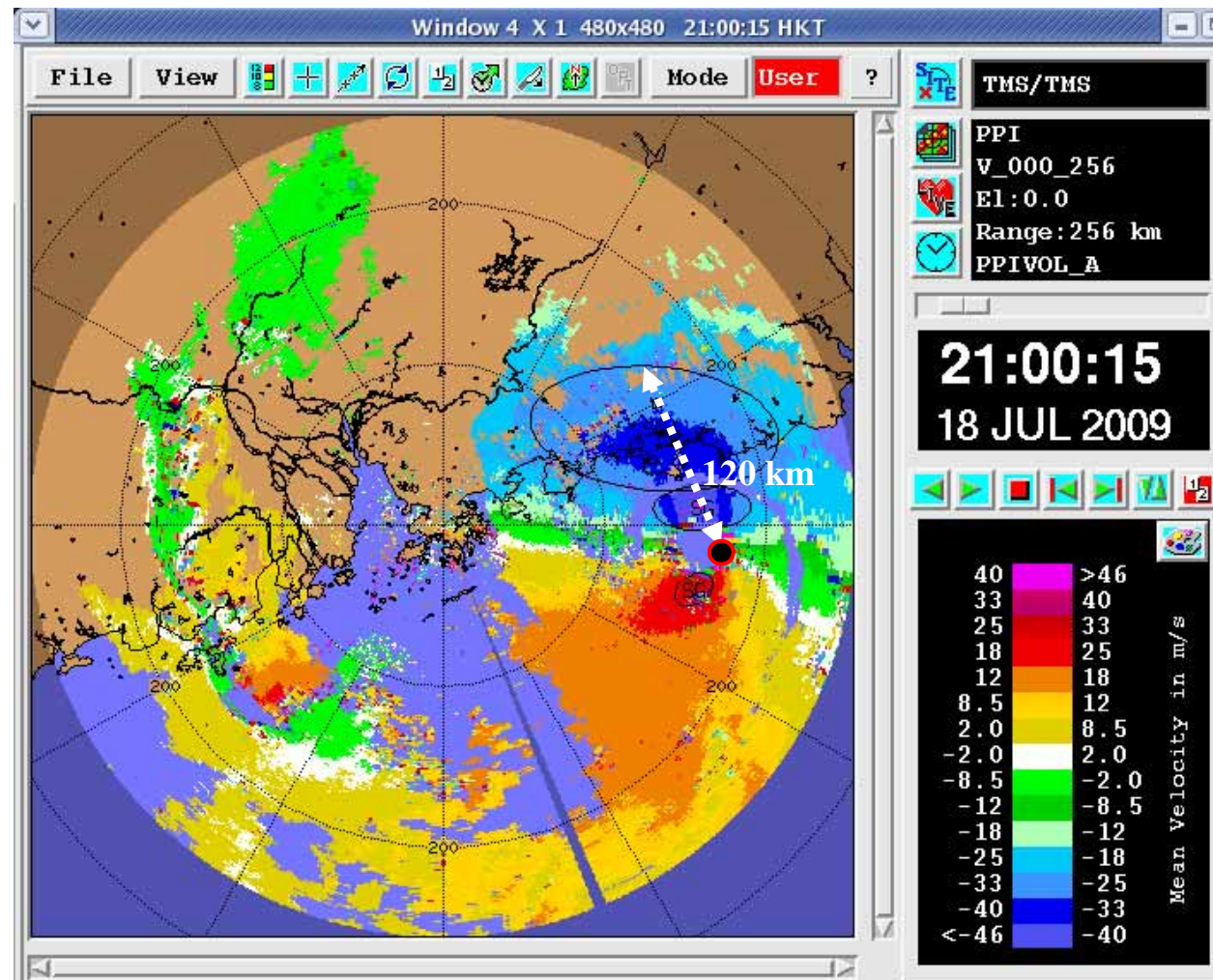
圖四 強烈熱帶風暴北冕的 xy 散佈圖， $y = -S_A \cos(D_1 - \theta)$ ， $x =$ 對應橫瀾風速表位置之大帽山天氣雷達 0 度仰角 PPI 徑向風速。

S_A = 橫瀾風速表 10 分鐘平均風速(m/s)

D_1 = 深水埗風廓線儀 1 公里高風向(degree)

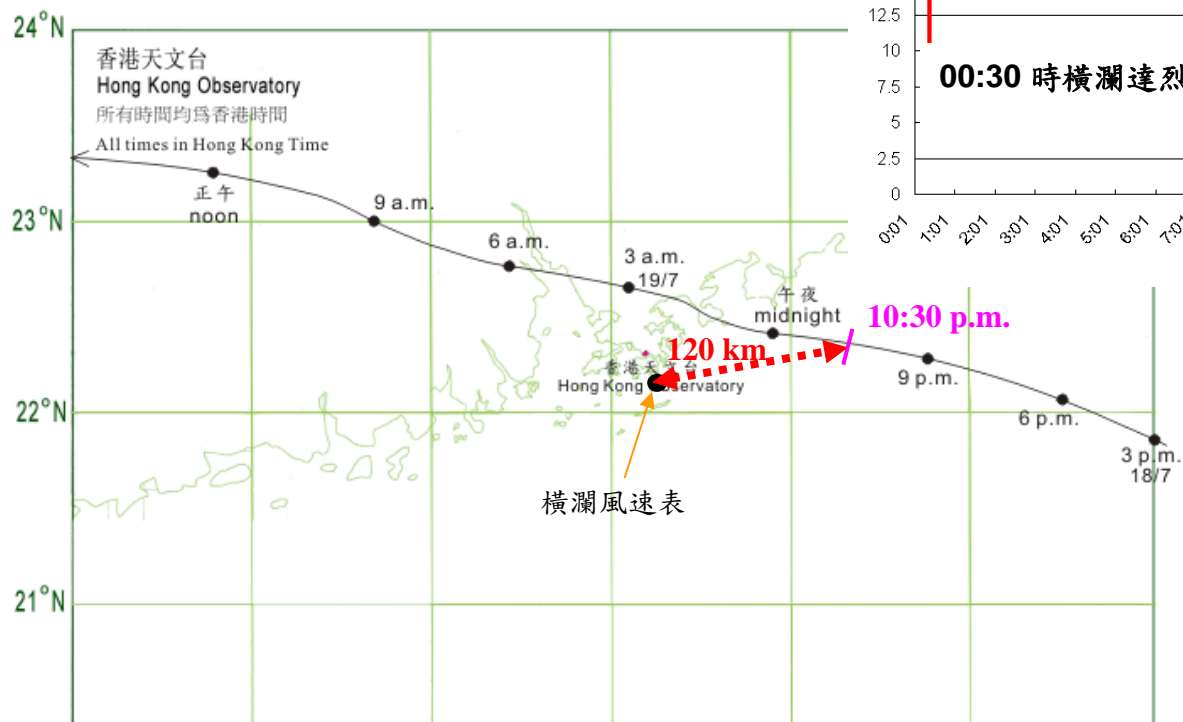
θ = 橫瀾風速表對應大帽山天氣雷達之方位角(degree)

● 莫拉菲中心位置



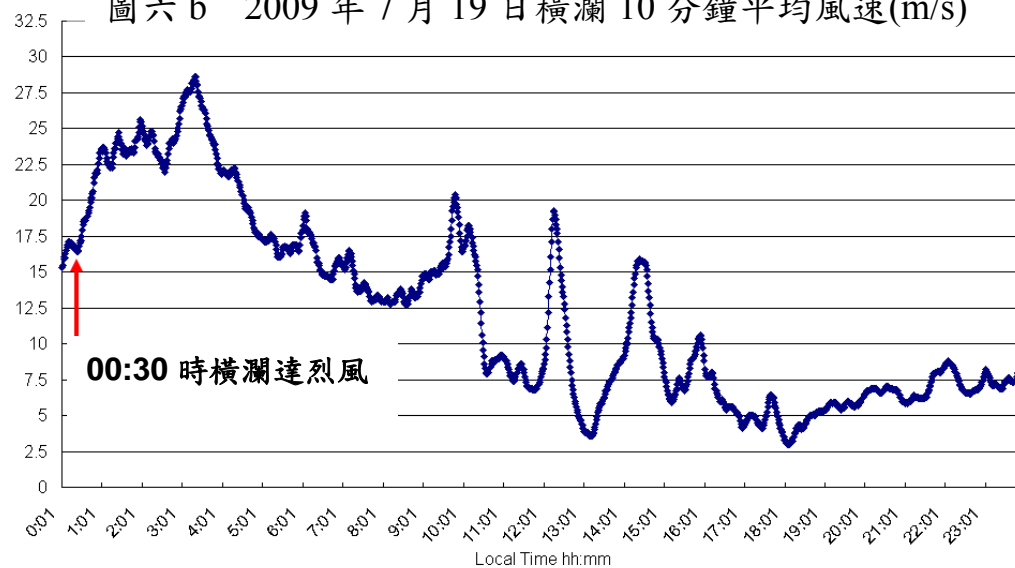
圖五 2009年7月18日21:00時大帽山天氣雷達0度仰角PPI徑向風速圖，圖中標有SG的橢圓為地面風大於烈風的區域，估計颱風莫拉菲的烈風半徑約為120 km。

圖六 a 颱風莫拉菲的接近香港時的移動路徑



圖六 從圖五得出莫拉菲的烈風半徑約為 120 km，以圖六 a 的移動路徑估計橫瀾達烈風時間約為 2009 年 7 月 18 日 22:30 時，這跟橫瀾實際錄得烈風的時間 00:30 時(圖六 b 紅色箭頭所示) 頗接近。

圖六 b 2009 年 7 月 19 日橫瀾 10 分鐘平均風速(m/s)



‘+’標誌最大徑向風速區域:

折疊速度 = +39.77 m/s

大帽山天氣雷達的最大不模糊速度

(Nyquist velocity) = 45.9 m/s

實際徑向速度

= 折疊速度 - 2 * Nyquist

= +39.77 - 2 * 45.9

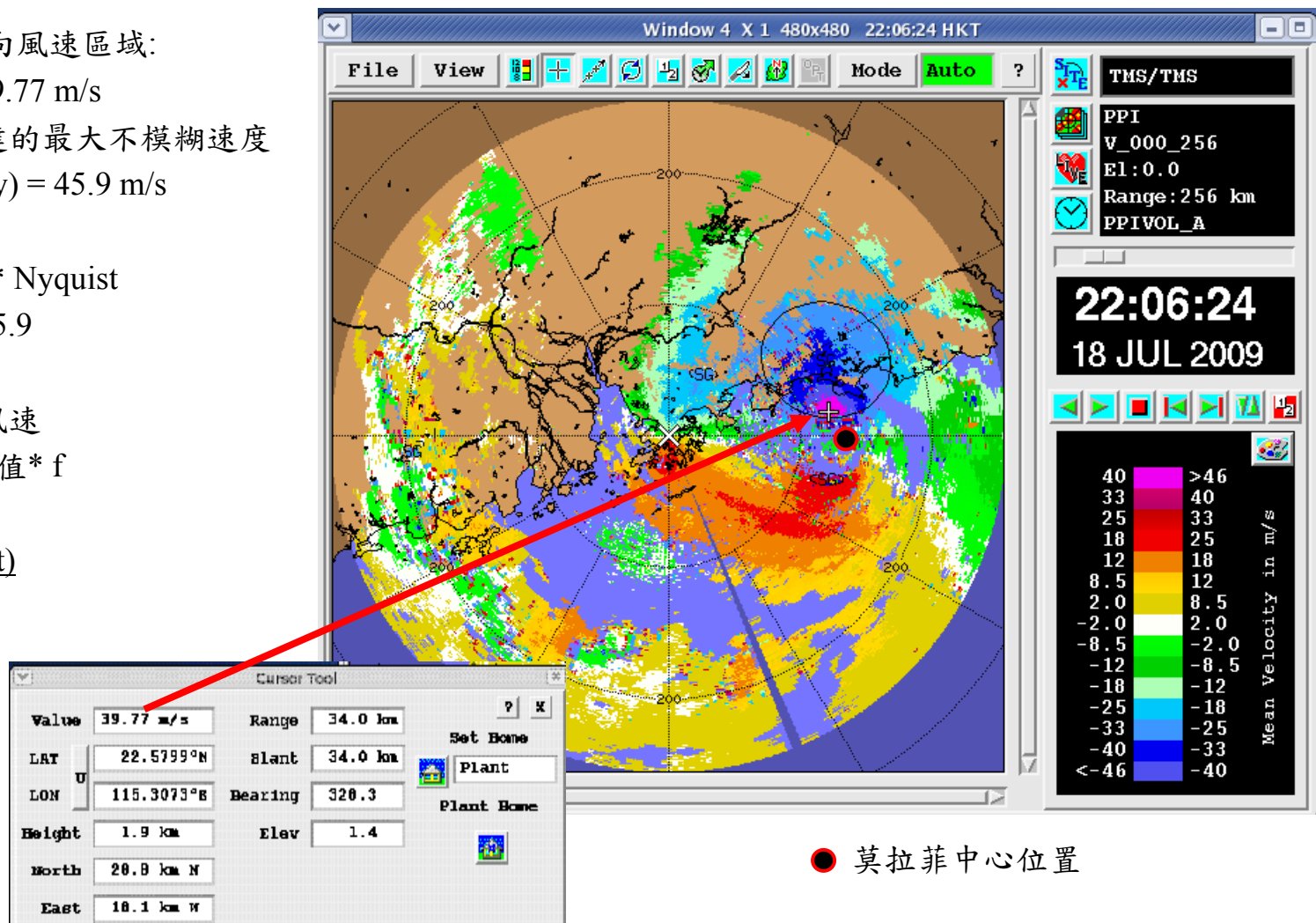
= -52.03 m/s

估計最大地面風速

= 實際徑向速度值 * f

= 52.03 * 0.7

= 36.4 m/s (71 kt)



圖七 2009年7月18日22:06時大帽山天氣雷達0度仰角PPI徑向風速圖。

編號	熱帶氣旋名字	數據日期、時間	f=地面風速/1 km 高風速	迴歸方程	R ² 值
1.	Leo 利奧	2342H 30 April 1999 – 2000H 1 May 1999	0.3763	$y = 0.3763x - 3.2568$	0.3136
2.	Maggie 瑪姬	0506H 7 June 1999 – 0706H 8 June 1999	0.8347	$y = 0.8347x + 0.3179$	0.6428
3.	Maria 瑪莉亞	1630H 31 Aug 2000 – 1500H 1 Sep 2000	0.6417	$y = 0.6417x + 1.5807$	0.4868
4.	Durian 榴槤	1000H 30 Jun 2001 – 1100H 2 Jul 2001	0.5491	$y = 0.5491x - 2.9563$	0.8013
5a.	尤特趨近香港 Utor Approaching	0918 5 July 2001 – 1206H 6 July 2001	0.4451	$y = 0.4451x + 3.1937$	0.523
5b.	尤特遠離香港 Utor Departing	1212H 6 July 2001 – 0436H 7 July 2001	0.9612	$y = 0.9612x + 1.9106$	0.613
6.	Hagupit 黑格比 2002	0500H 11 Sep 2002 – 0530H 12 Sep 2002	0.6137	$y = 0.6137x - 2.6828$	0.7685
7.	Imbudo 伊布都	1442H 23 Jul 2003 – 0218H 24 Jul 2003	0.4436	$y = 0.4436x - 3.831$	0.6273

編號	熱帶氣旋名字	數據日期、時間	f=地面風速/1 km 高風速	迴歸方程	R ² 值
8.	Krovanh 科羅旺	1800h 23 Aug 2003 – 1200H 25 Aug 2003	0.5024	y = 0.5024x - 3.4036	0.5603
9.	Dujuan 杜鵑	1206H – 2154H 2 Sep 2003	0.642	y = 0.642x + 1.251	0.7243
10.	Damrey 達維	1754H 23 Sep 2005 – 0000H 26 Sep 2005	0.593	y = 0.593x - 1.153	0.7253
11.	Prapiroon 派比安	0442H 2 Aug 2006 – 0648H 4 Aug 2006	0.4566	y = 0.4566x - 3.787	0.7442
12.	Neoguri 浣熊	2130H 17 Apr 2008 – 0300H 20 Apr 2008	0.4751	y = 0.4751x - 5.2483	0.3803
13.	Fengshen 風神	2230H 24 Jun 2008 – 0406H 25 Jun 2008	0.4256	y = 0.4256x + 2.2224	0.5469
14.	Kammuri 北冕	0912H 5 Aug 2008 – 0712H 7 Aug 2008	0.6395	y = 0.6395x - 0.745	0.8186
15a.	鸚鵡登陸前 Nuri before landing	1930H 21 Aug 2008 – 1300H 22 Aug 2008	0.6034	y = 0.6034x + 0.4539	0.4932
15b.	鸚鵡登陸後 Nuri after landing	2030H 22 Aug 2008 – 1124H 23 Aug 2008	0.5119	y = 0.5119x - 1.0977	0.4680
16.	Hagupit 黑格比 2008	1700H 23 Sep 2008 – 1248H 24 Sep 2008	0.7777	y = 0.7777x + 1.2678	0.6229

以下是附錄一表列的 10 個 R^2 值大於或等於 0.6 的熱帶氣旋個案的 xy 散佈圖，

$$x = V_d$$

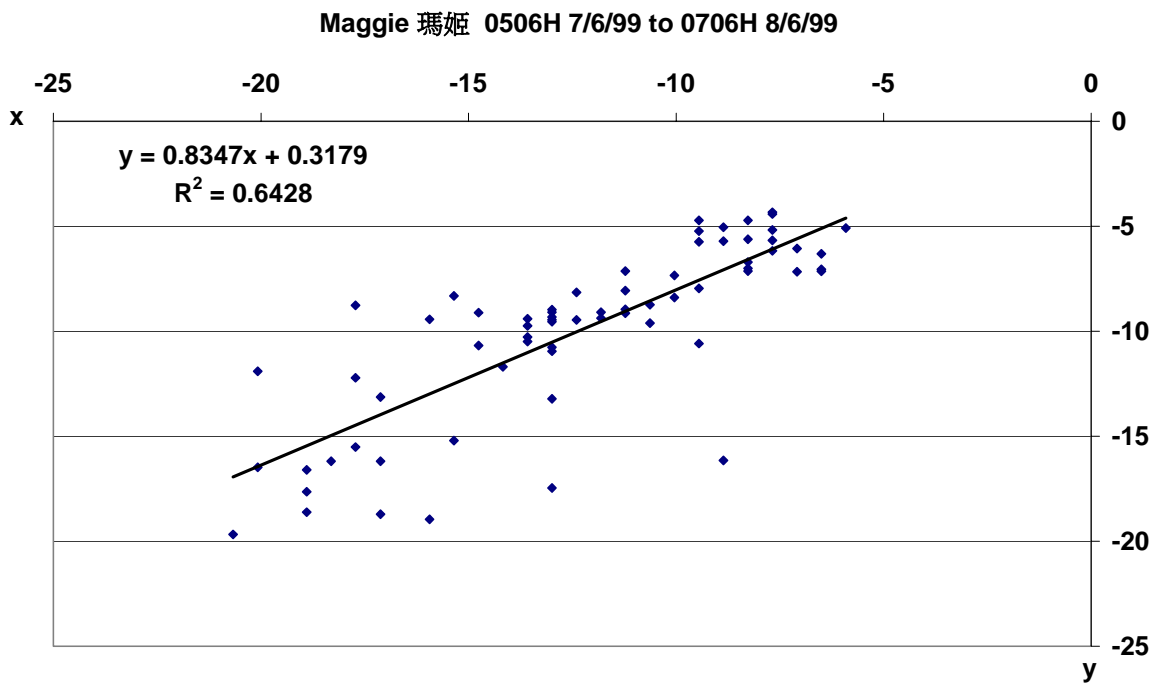
$$y = -S_A \cos(D_1 - \theta)$$

V_d = 對應橫瀾風速表位置之大帽山天氣雷達 0 度仰角 PPI 徑向風速 (約 1 公里高)

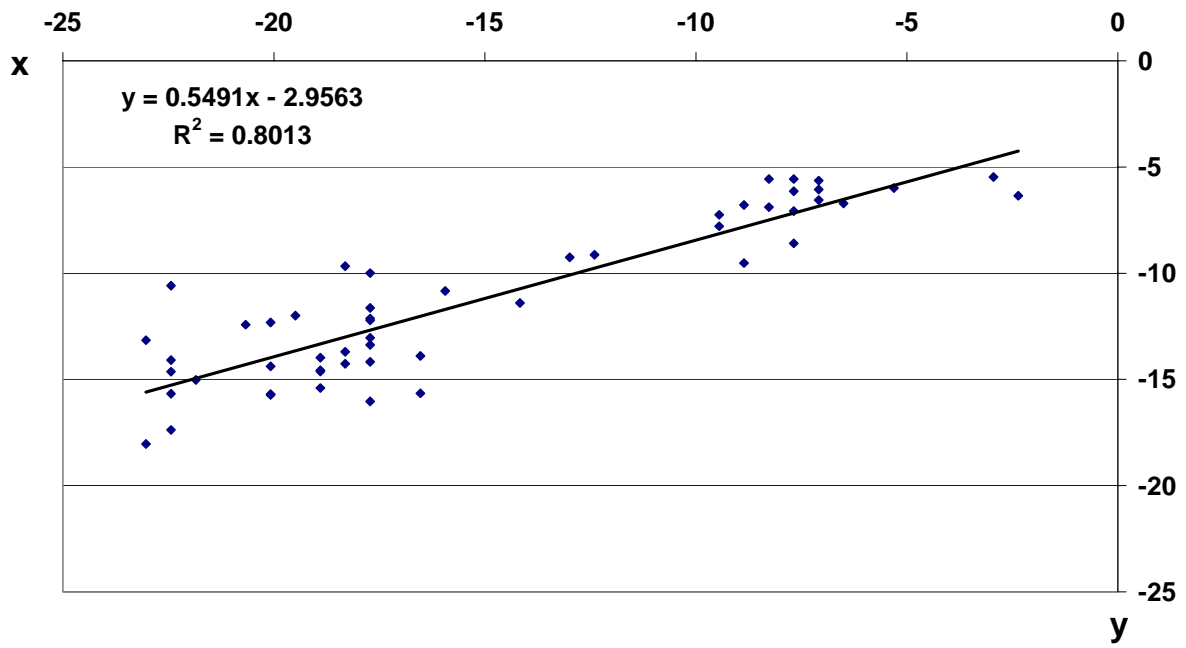
S_A = 橫瀾風速表 10 分鐘平均風速(m/s)

D_1 = 深水埗風廓線儀 1 公里高風向(degree)

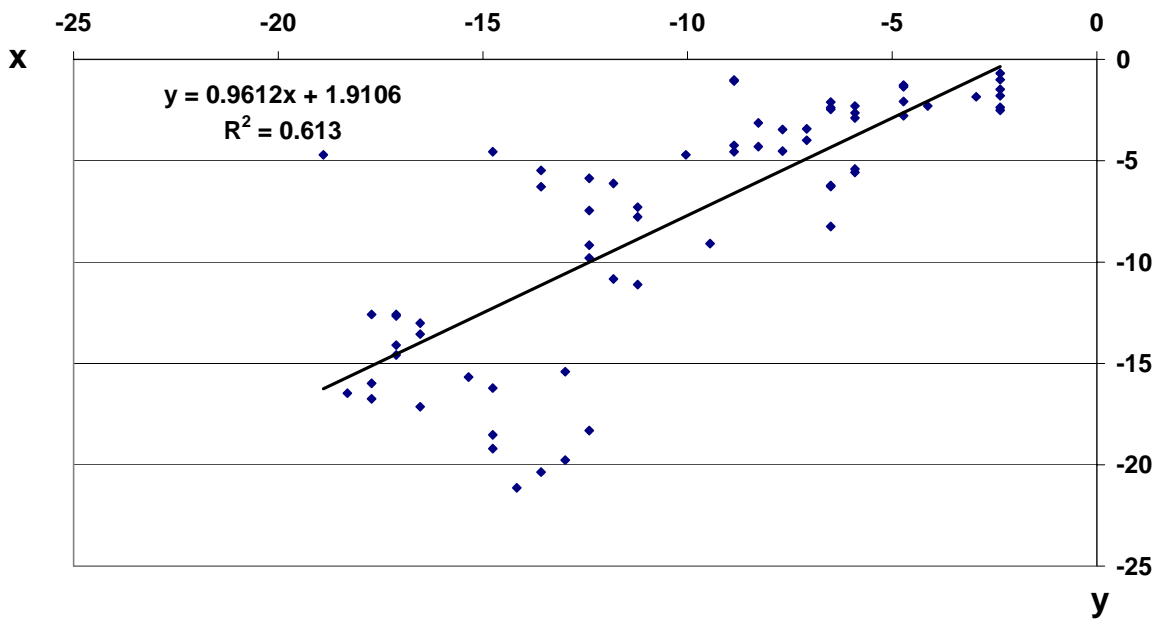
θ = 橫瀾風速表對應大帽山天氣雷達之方位角(degree)



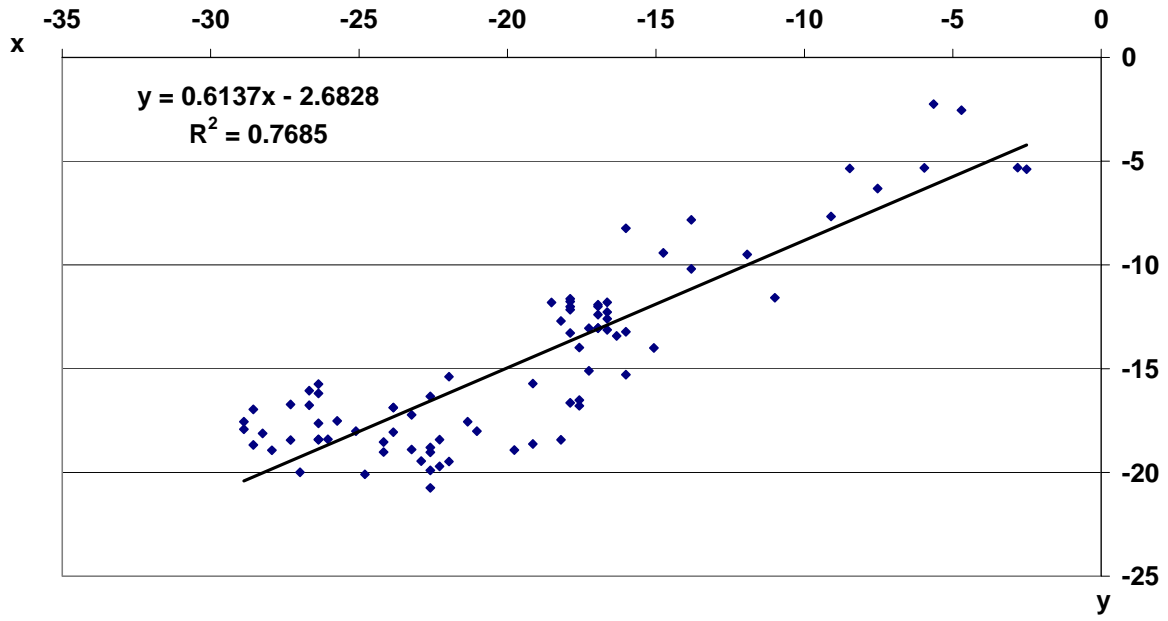
Durian 榴槤 1000H 30/6/01 to 1100H 2/7/01



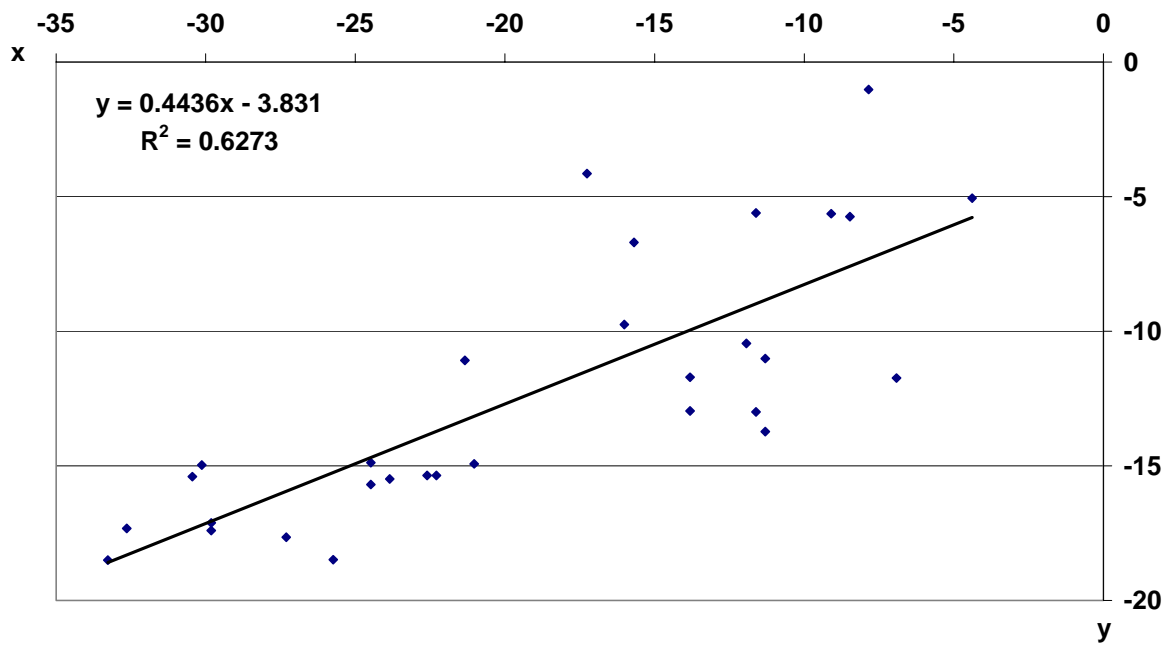
尤特遠離香港 Utor departing from Hong Kong
1212H 6/7/01 to 0436H 7/7/01

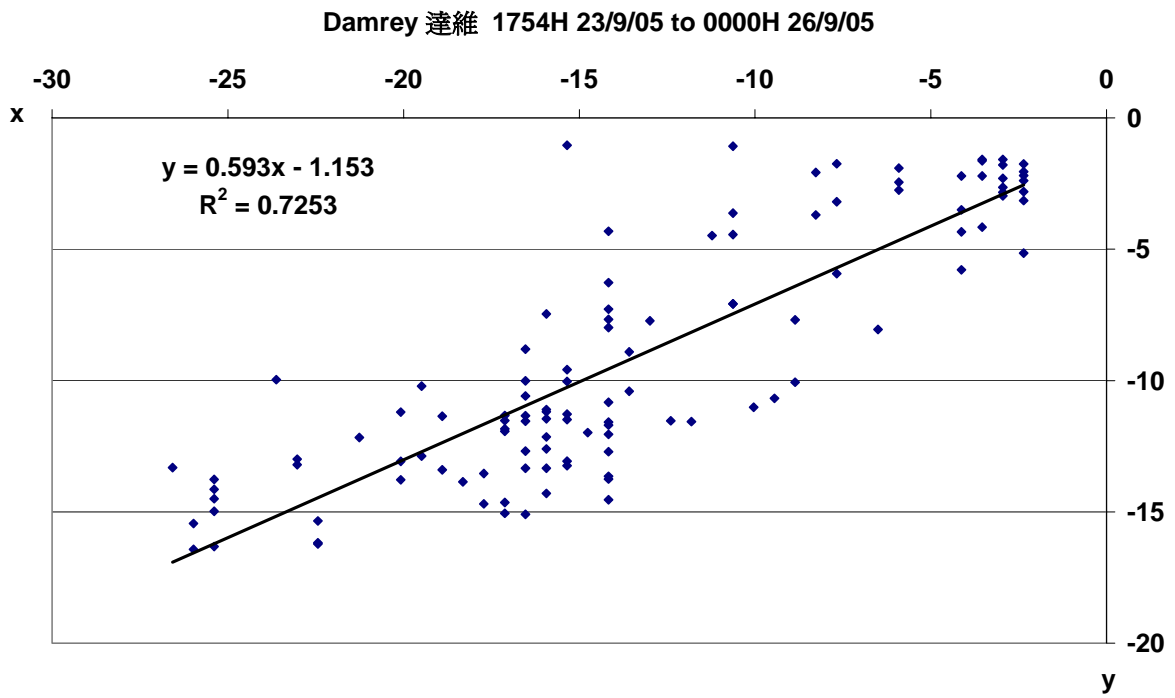
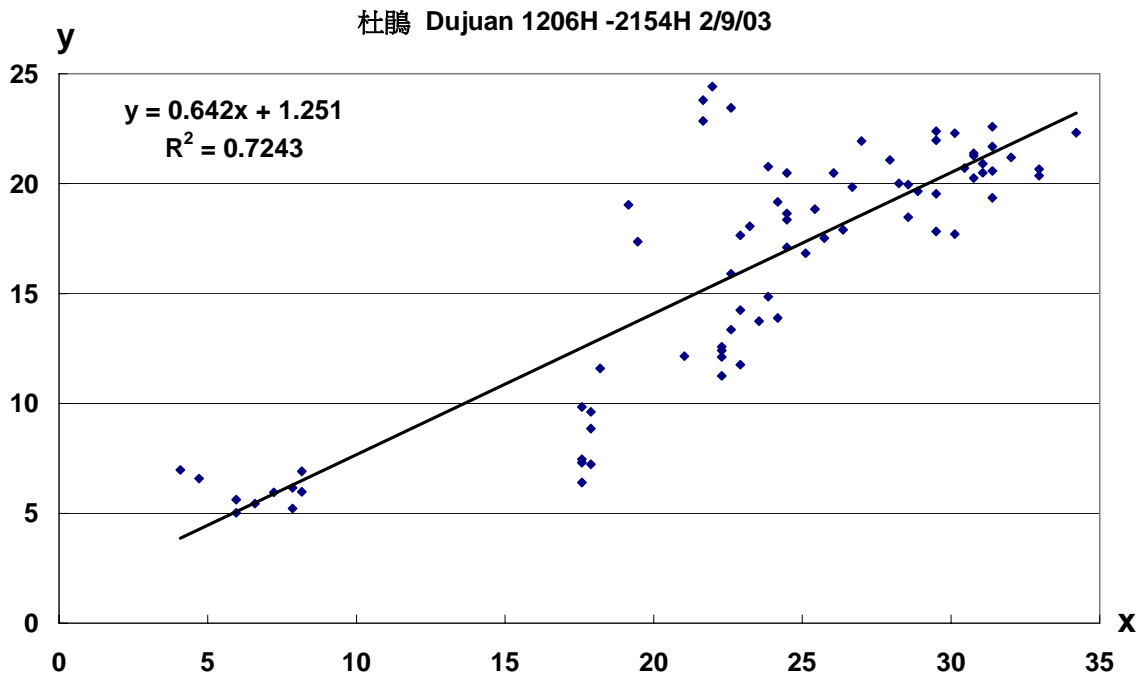


Hagupit 黑格比 0500H 11/9/02 to 0530H 12/9/02

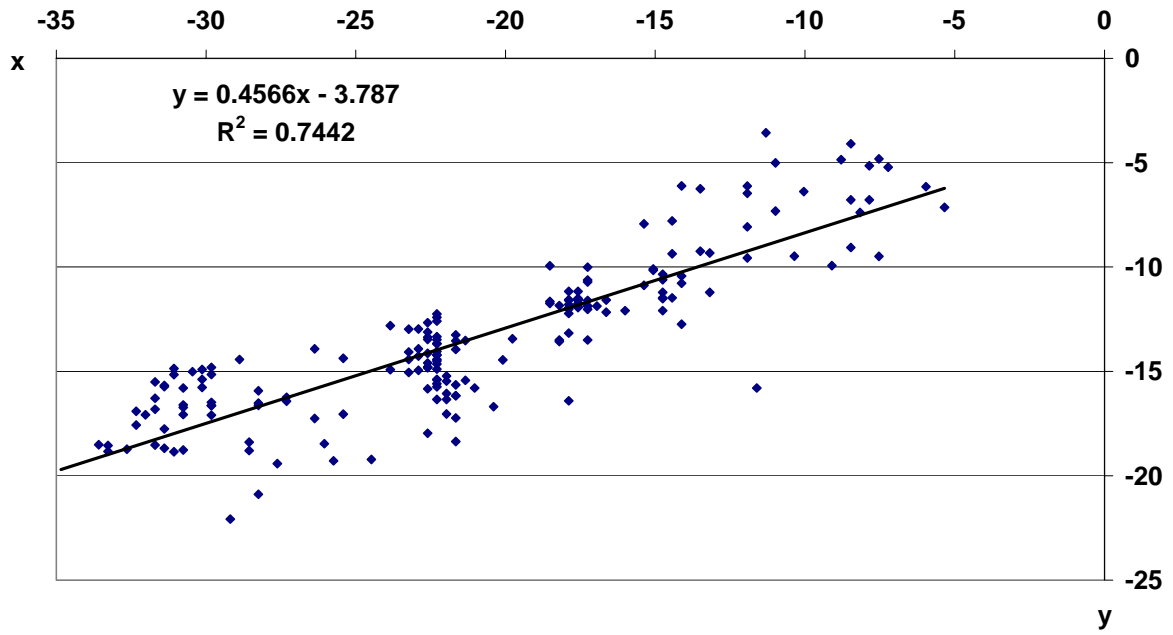


Imbudo 伊布都 1442H 23/7/03 to 0218H 24/7/03

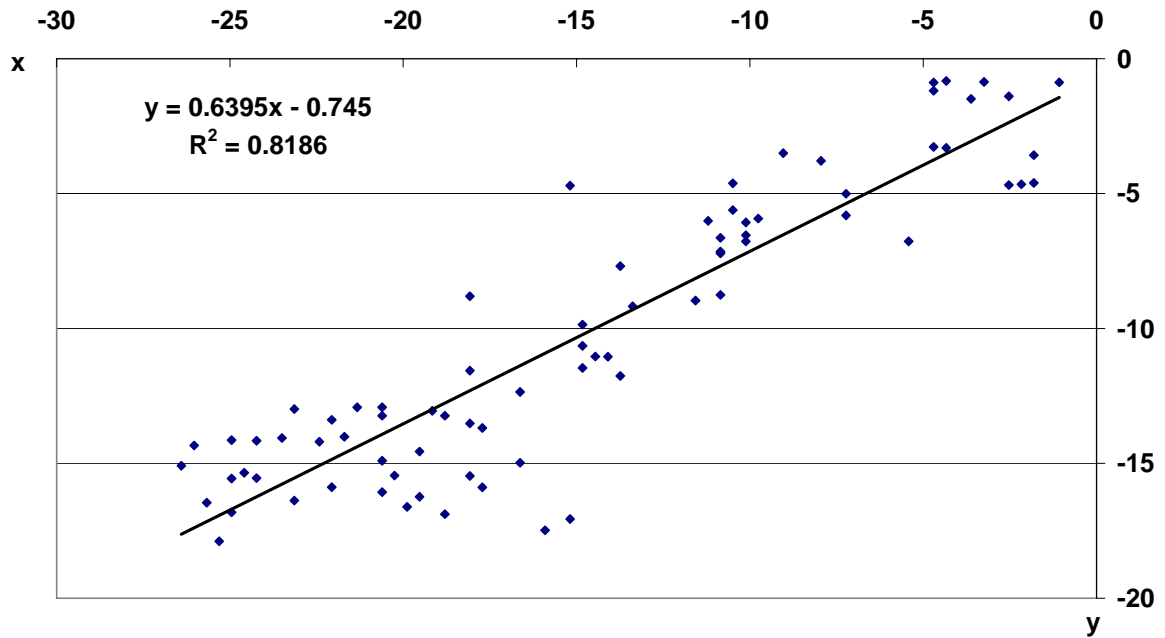




Prapiroon 派比安 0442H 2/8/06 to 0648H 4/8/06



Kammuri 北冕 0912H 5/8/08 to 0712H 7/8/08



Hagupit 黑格比 1700H 23/9/08 to 1248H 24/9/08

