

中壢 V H F 雷達測風技術之發展及應用

潘貞杰* 劉兆漢** 林沛練*

* 國立中央大學大氣物理研究所

**國立中央大學太空科學研究所

摘 要

本文利用中壢特高頻雷達之測風速特性對大氣風場做進一步之研究。文中介紹應用於特高頻雷達之各種測風法及其所衍生的測動量通量(Momentum Flux) 法及對中尺度之渦度場及輻散之測量方法。最後將這些觀測技術應用於對颱風之觀測。

一、簡介

特高頻(VHF) 雷達從發明，到大量興建與應用，前後不到 20 年的時間 (Woodman and Gullen, 1974)。在此之前，高空探測的任務，大多交由探空氣球、火箭及人造衛星完成。不同工具之加入，增廣了探測領域，也增加了對大氣之了解。

特高頻雷達之特色在於幾秒鐘便有一個回波之高度剖面圖，可以做長期的觀測，且解析度可達 150 公尺，對研究天氣系統之結構及變化上，是其它儀器無法比美的。而其缺點在於無法直接測量氣壓、溫度及濕度。

本文將首先介紹特高頻雷達之各種測風原理。再對其應用加以探討。在其應用方面，主要針對測量大氣之動量通量(Momentum Flux) 方法及測量中尺度之渦度、輻散場之方法加以討論。最後，將以上之觀測技術及分析方法應用於觀測蘇珊颱風 (Typhoon Susan)。

二、測風法之研究

風場是大氣動力學上最重要的參數之一，其本身便是大氣之運動場，由運動所涉及的能量分配、平衡... 等問題，對天氣系統之成長、消失及移動

，都是最重要的因素。故對風場的研究是大氣研究上極重要的一環。有許多重要的現象及觀念都是在對風場有進一步了解後所產生。例如，噴射氣流 (Jet Stream) 及其伴生的波動及亂流現象，對動力研究及低層的高低壓之移動乃至飛航安全都極重要。又如垂直風場直接影響了能量及水汽之傳送，對於天氣系統如颱風及鋒面之生成極為重要。本節將著重於對測風法之研究，而由風場所衍生的一些觀念，將依次在以下各節討論。

利用特高頻雷達測量大氣風場，一般有三種最廣受採用的方法。第一種為間距天線測風法 (Space Antenna Method; 簡稱 SA) (Briggs et al., 1950; Briggs, 1984)。傳統做法是將所有天線設在垂直方向，但由 Liu 等人(1991) 證明，傾斜方向亦可求水平風速，圖 1 中字母 E, W, S 和 N 分別表示由向東、西、南和北傾斜 17 度所求得之水平風速，實線則是用垂直向之傳統 SA 做法。而 U 和 V 分別表示緯向(Zonal) 和經向 (Meridional) 之風速。此五個不同方向所得風速相當一致，除了證明前一章的理論無誤外，最重要的是發明了用一座雷達可求上空五個不同方向之水平風速，意即用一座雷達便可求得大氣之渦度 (Vorticity)。第二種測風法為 都卜勒波束旋轉法 (Doppler Beam Swing; 簡稱 DBS)，即採用 Doppler 原理。當大氣和雷達有相對運動時，其相徑 (Phase Path) 會改

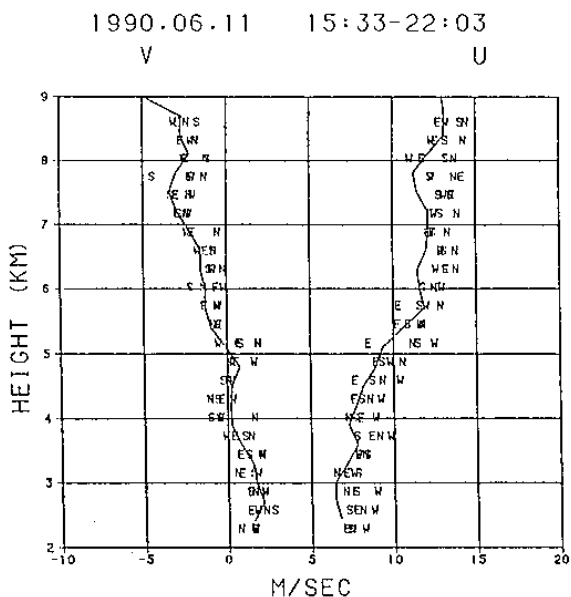


圖 1 利用垂直及傾斜 SA 測風結果。其中實線為垂直向。E, N, W, S 為向東、北、西、南傾斜所得。

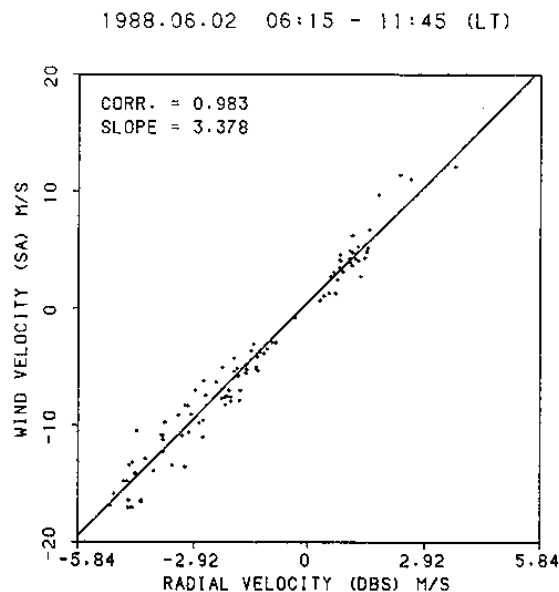


圖 2 利用傾斜 SA 法及 DBS 法所求風速之迴歸分析。

變，即產生了都卜勒頻移 (Doppler frequency shift)，可用來估算相對速度，即徑向風速 (Radial Velocity)。利用此法求大氣之三維風場時，須將天線向兩個互相垂直的方向 (如向東和向北) 傾斜，求得此二方向之風速分量，再用垂直方向的天線求垂直速度。且利用此方法，亦須假設風場具均勻性 (Homogeneous)。此法對大氣觀測最重要的貢獻在於可以直接量測垂直速度。因為垂直運動在大氣動力上之地位非常重要。在過去無法直接測量，但又不可或缺的情況下，常用一些間接的做法，例如：設大氣為不可壓縮，或設大氣為絕熱 (Adiabatic)，再利用水平輻散場 (Divergence) 來反推 (Holton, 1979)，但這些做法各有缺點，均不如直接量測來得正確。第三種方法為雷達干涉法 (Radar Interferometry) (Farley et al., 1981; Rottger and Ierkic, 1985)，其原理為：位於天頂角 θ 處的散射體對於相距 d 距離的兩組雷達的相位部分將產生 $kd\theta$ 的相位差，其中 k 為波數 (Wave Number)。散射體隨著風場移動其位置，即 θ 隨時間而改變，則求兩組天線相位差隨時間之變化可推得散射體移動速度。利用此方法時，必須有一個很集中的散射體 (Localized Scatterer)，且雷達取樣及分析之時間應極為迅速，以免散射體移出天線波束。

對中壘特高頻雷達而言，因發射功率不夠，無法觀測 60 公里以上的區域，該區的散射體較為集中 (Localized)，故雷達干涉法求風速仍無法進行。目前可利用 SA 及 DBS 方法求風速。中壘特高頻雷達建立時，所設計之天線陣，便是為了可同時用此兩種測風法測風並比較其優劣。在當時尚未有傾斜 SA 的觀念，故比較此兩種測風法時，須分別做 SA 和 DBS 的觀測，即觀測時間不同。且用 DBS 法時，須分別將兩組天線朝東及朝北而求得水平風速，須設風場為均勻 (Homogeneous)。由此可看出並無法很直接的去比較這兩種方法。但因為傾斜 SA 可以求得水平風速，即我們可以用相同的資料，利用此兩種測風法測風，圖 2 便是將三組天線朝東傾斜觀測，一方面可得出水平風速，另一方面可得出東向的徑向風速，且兩者之關係為

$$V_r = U \sin \theta + W \cos \theta$$

θ 為天線傾斜角，中壘雷達為 17 度。
 U 為水平風速之東向分量。
 V_r 為徑向風速之東向分量。
 W 為垂直風速。

圖 2 所得之迴歸線為

$$V_r = 3.378 U + 0.553$$

比較上兩式可發現迴歸線之斜率 3.378 很接近 $1/\sin 17^\circ$ (≈ 3.42)。而 U 和 V 之相關係數為 0.983，便表示此二測風法之結果極為相似。這是對此兩種測風法最直接之比較。

另外值得一提的：在上述資料之觀測時間內，全台灣正受蘇珊颱風 (Typhoon Susan) 侵襲，颱風眼正在恆春半島 (圖 3)。此說明了傾斜 SA 測風法在劇烈天氣現象下，所得之風速和 DBS 相同。以往認為 SA 只能在晴朗的天氣下，靠大氣之層狀結構的回波求風速的觀念，在此被推翻。

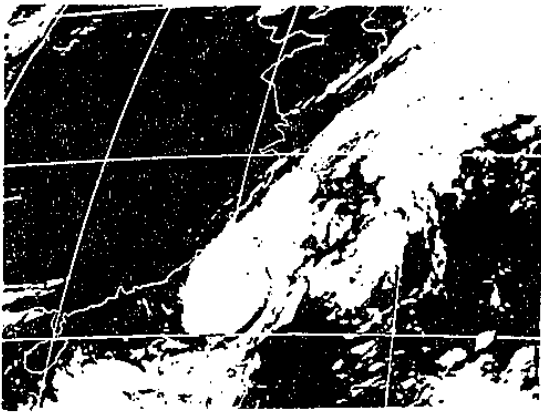


圖 3 1988年 6月 2日 00Z 之衛星雲圖。

三、大氣的動量通量之觀測

動量的傳送及轉移，在大氣環流及高低層大氣之交互作用上，扮演著相當重要的角色。對重力波 (Gravity Wave)... 等波動現象之研究，也是因其能將能量及動量向外傳播，對能量、動量在收支平衡及傳送，有重要的影響，故廣受學者重視。

動量通量 (Momentum Flux) 在垂直方向之梯度變化，將產生一個水平加速度。此加速度之大小和動量通量的垂直梯度成正比，但方向相反。故若緯流向之動量通量隨高度增加，則將有負值的加速度，即產生一個緯向阻泥力。

當重力波往上传播時，因其振幅向上呈指數成長，終將造成對流不穩定或風切不穩定而使重力波破碎 (Gravity Wave Breaking)，在重力波破碎的

高度，動量通量隨高度增加 (Geller, 1983) 遂提供了一個阻泥力，使其振幅不再繼續成長，此減速作用使得平均流場之速度趨近於重力波之相速。一般認為此阻泥力在大氣流場之能量及動量平衡上，是最重要的因素 (Geller, 1983)。當不考慮波動及阻泥作用時，Geller 所使用之模式發現將使冬季平流層溫度過低，而夏季中氣層之溫度過高。但其模式中，加入了阻泥力之後，則結果較符合目前所得之觀測結果。故動量通量在大氣環流之能量、動量收支平衡上所扮演角色之重要性由此可見 (Holton and Zhu, 1984)。

首先測得動量通量大小的為 Vincent 及 Reid (1983)，在其結果中發現動量通量所提供的阻泥力為 $20 \text{ ms}^{-1}/\text{day}$ ，其大小和理論上平衡平均流場所須之值相近。其方法如下：設雷達所測之徑向速度為 V_i ，足碼 i 可為 1, 2, 3, 4 或 5，分別代表向東、西、南、北及垂直方向，而其方差 (Variance) 為 $\langle V_i^2 \rangle$ ，並令 U 為東西方向 (即緯流向)， V 為南北方向 (即經流向) 之水平風速， W 為垂直風速， θ_B 為天線傾斜角，則

$$\langle u^2 \rangle = \frac{1}{2 \sin 2\theta} [\langle V_1^2 \rangle + \langle V_2^2 \rangle]$$

$$-\frac{1}{\tan^2 \theta} \langle V_5^2 \rangle$$

$$\langle v^2 \rangle = \frac{1}{2 \sin 2\theta} [\langle V_3^2 \rangle + \langle V_4^2 \rangle]$$

$$-\frac{1}{\tan^2 \theta} \langle V_5^2 \rangle$$

$$\langle w^2 \rangle = \langle V_5^2 \rangle$$

再經一些算術運算則可得動量通量 $\langle UW \rangle$ 及 $\langle VW \rangle$ ，且

$$\langle uw \rangle = \frac{1}{2 \sin 2\theta} [\langle V_1^2 \rangle - \langle V_2^2 \rangle]$$

$$\langle vw \rangle = \frac{1}{2 \sin 2\theta} [\langle V_3^2 \rangle - \langle V_4^2 \rangle]$$

此為第一次直接測量之理論。但此理論須設風場為均勻風場，且在觀測時間內 U、V 及 W 等均保持不變。

以上之做法，基本上所使用之測風法為 DBS 法，即在不同地點測得各風場之徑向分量，故須有上述做法及假設。此法為目前世界上利用雷達測量 $\langle UW \rangle$ 及 $\langle VW \rangle$ 的唯一方法。但若能在同一地點及時間，同時求得 U、V 及 W，則可直接求得 $\langle UW \rangle$ 及 $\langle VW \rangle$ 。利用 SA 測風法，便可達此目的，其優點除了可測同一地點及時間之 $\langle UW \rangle$ 及 $\langle VW \rangle$ 之外，亦免去了 Vincent 及 Reid 法所須之假設，可直接的去測量。圖 4 為 1990 年 4 月 23 日 11 時至 17 時之平均 $\langle UW \rangle$ 及 $\langle VW \rangle$ ，圖中 D 為 Vincent 及 Reid 之測法，S 表示用 SA 測風法直接測量所得。可發現此二法所得之結果頗為吻合。此為測 $\langle UW \rangle$ 及 $\langle VW \rangle$ 之另一方法。

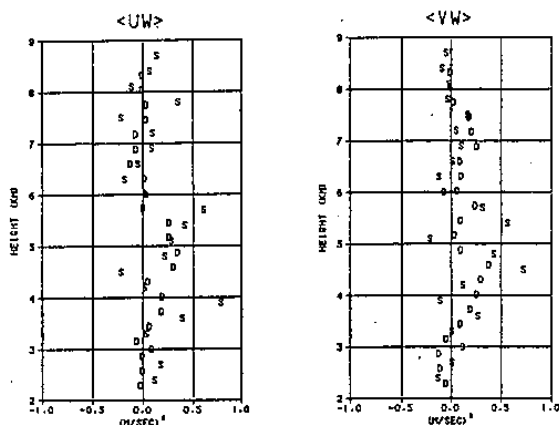


圖 4 雷達測量動量通量 $\langle UW \rangle$ 及 $\langle VW \rangle$ 之結果。其中 D 代表 Vincent - Reid 法，S 為用 SA 測風法推算之結果。

四、中尺度之渦度、輻散場之觀測

渦度及輻散是水平流場中極重要的兩個參數，渦度代表著流場的旋轉，類似固體因旋轉產生之角速度。一般以氣旋向（逆時針向）轉動為正值，在氣象學上有兩種渦度，一為環境渦度 f (Ambient Vorticity)，因地球自轉所產生。另一為相對渦度 ζ (Relative Vorticity)，即相對於 f 之渦度大

小。另定義 $\eta = f + \zeta$ 為絕對渦度。輻散代表空氣塊對某參考點之向外流動，常伴隨著垂直運動，輻合則和輻散之方向相反。在氣象上常用到的渦度為垂直向之分量，而輻散為水平輻散。本章中所討論之渦度及輻散，亦僅限於垂直方向之渦度及水平方向之輻散。

渦度之重要性在高度傾向方程 (Geopotential Tendency eq.) 或稱預報方程 (Prognostic eq.) 中便可見，在準地轉理論下，渦度平流，即 $-f\vec{v} \cdot \nabla \eta$ 項，在短波為主的系統 (即 $\nabla \zeta \gg \nabla f$) 之下，正渦度平流使系統向西位移；而在長波為主的系統 ($\nabla \zeta \ll \nabla f$) 之下，則向東位移。當溫度平流的作用很小時，高層槽脊之移動，對低層之高、低壓之移動，有牽引的作用。對大尺度之天氣系統，有預報之功能，(Holton, 1979)。在中、小尺度方面 Larsen 指出，渦度對研究鋒生、高層鋒和對流層頂重疊 (Tropopause Folding) 間之關係頗值得研究 (Larsen, 1988)。故測量渦度及輻散場是一件極重要的工作。

在觀測技術上，若能測得三個不同地點以上之水平風速，便可求得渦度及輻散。故在傳統之觀測技術上，只要密集設站便可測得此二量。但由於測站 (尤其是探空站) 的距離常在 10 至 100 公里間，故對綜觀尺度 (Synoptic Scale) 而言可以勝任，但對於更小尺度而言便顯不足。

利用都卜勒雷達可研究中、小尺度之系統，因其可求得不同方向之徑向速度，故可測輻散場。但無法求得渦度。於是在觀測技術上，一直無法測得中、小尺度之渦度場。但此問題在此可被突破。

利用傾斜 SA 測風速可以測得數個不同地點之水平風速。而各點之距離為徑向距離和傾斜之天頂角之乘積。在對流層內，天頂角在十多度附近，則各點之距離約在 2 至 10 公里，故可提供中尺度 (Meso-scale) 之渦度及輻散場。渦度場可利用下式推得，

$$\chi = \frac{\partial V}{\partial X} - \frac{\partial U}{\partial Y}$$

其中 u 為 x 方向之速度分量， v 為 y 方向之速度分量。

而水平輻散 D 則為

$$D = \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y}$$

值得一提的是，以上二量大小之數量級約為速度差除以距離差。當討論大尺度現象時，當速度差之誤差為 1 m/s 時，其數量級約為 10^{-4} 到 10^{-5} 左右，用雷達求中尺度之結果時，則誤差之數量級常大至 10^{-3} 左右。故中尺度之研究尚須十分注意由誤差而生之影響，雖然如此，但此二量隨高度及時間之變化趨勢頗值得注意及研究。

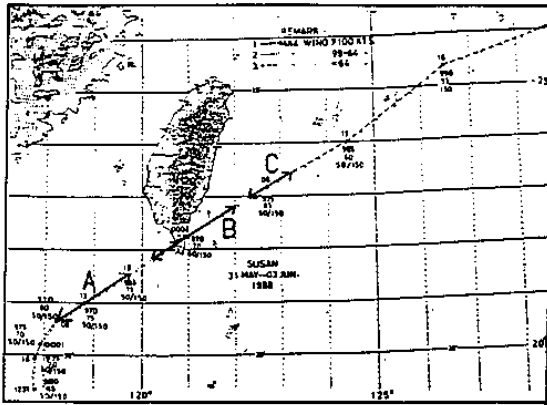


圖 5 蘇珊颱風 (Typhoon Susan) 路徑圖

五、特高頻雷達觀測颱風

本節將以 1988 年 6 月 1、2 日侵襲本省的蘇珊颱風 (Typhoon Susan) 為例，將雷達觀測之結果逐一討論。

圖 5 為蘇珊颱風之行進路徑，在 5 月 31 日生成之後，在呂宋島西北方轉向東北方向行進，往恆春半島而來。另外在大陸沿海亦有一道梅雨鋒面南移，二者互相影響台灣。中壢雷達於 6 月 1 日下午展開觀測，其時間如下表所示。

磁帶編號	觀測時間	日期
661	14:30 — 17:34	1988 年 6 月 1 日
662	17:41 — 20:28	1988 年 6 月 1 日
663	20:34 — 23:15	1988 年 6 月 1 日
664	23:20 — 01:52	1988 年 6 月 1 日
665	05:15 — 09:03	1988 年 6 月 2 日
666	09:07 — 11:45	1988 年 6 月 2 日
667	13:19 — 16:07	1988 年 6 月 2 日

此七卷磁帶的觀測模式均相同，起始觀測高度為 1.5 公里，取樣層數為 40 層，空間解析度為 300 公尺。三組天線陣週期性的同時往垂直，朝東、垂直，朝北發射及接收。每個方向各停留 2 分鐘，故完成一個觀測週期為 8 分鐘。

圖 6a 為 661 至 664 此四卷磁帶約 12 小時的動量通量平均。此段時間內，動量通量除了在 6 公里附近高度稍有擾動之外，其餘高度並無明顯變化。顯示這段時間內颱風系統尚未影響到中壢，中壢上空並無明顯的動量傳輸。

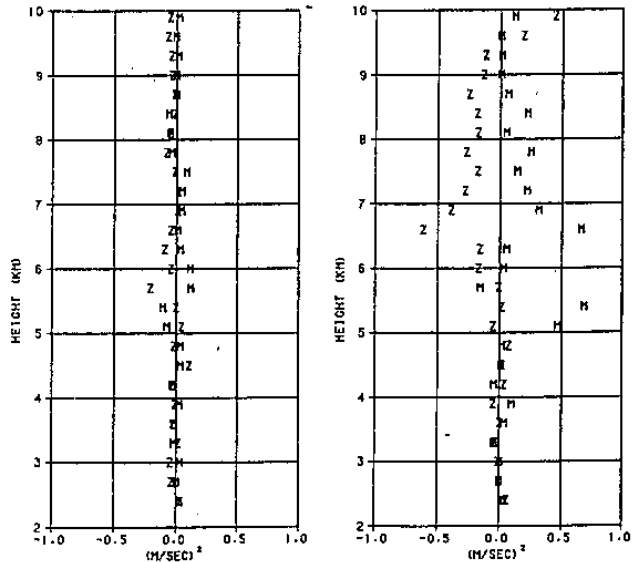


圖 6a 為 661 至 664 此四卷磁帶約 12 小時的動量通量平均

圖 6b 為 665 和 666 兩卷磁帶 6 小時的動量通量平均

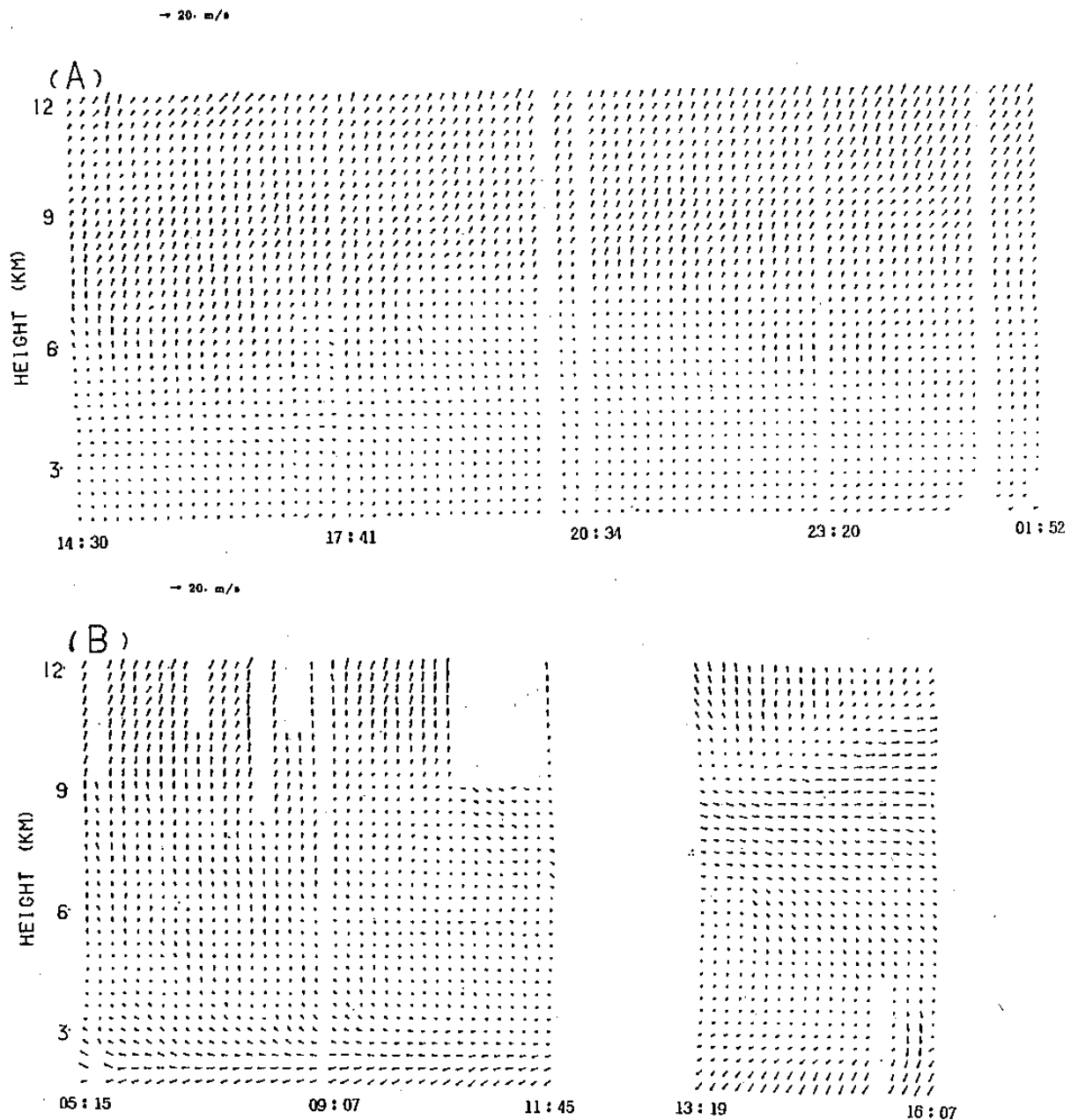


圖 7 為 8 分鐘平均之瞬間風場

圖 6b 為 665 和 666 兩卷磁帶 6 小時的動量通平均，此時颱風中心在恆春半島，且整個系統往東北方向前進，整個環流和梅雨鋒面連接，籠罩全台，台灣上空的整個天氣系統應有強烈的南北方向之動量傳送，由圖 可見，在 5 公里以下動量通量的值並無顯著變化，這可能是因為受中央山脈影響所致。而 5 公里以上 $\langle VW \rangle$ 的變化十分明顯，由其變化趨勢顯示 5 公里上空有向北的加速度，一直到 9 公里之後，可能由於環流減弱，致使 $\langle VW \rangle$ 之

值逐漸減小。另外， $\langle UW \rangle$ 部分之變化趨勢雖不如 $\langle VW \rangle$ 劇烈，但在 5 公里之上，仍有往西的加速度，但因東西方向受中央山脈地形的影響，須做進一步之分析。

圖 7a 為 8 分鐘平均之瞬間風場，分別對應磁帶 661 到 664。在這四個觀測時段內，台灣尚未受蘇珊颱風的影響，整個風場在這約 12 小時的時段內，並無重大改變，但此時風場的特色在於高空

之經向風場較緯向風場明顯，雖然西風帶的特性仍舊保持，但高空風場中南風的貢獻最顯著。圖 7b 對應磁帶 665 至 667，為颱風中心在恆春半島附近之時段，此時風向及風速變化很大，磁帶 665 在離地 2 公里左右吹東南風，往上則以南風為主，西風帶則不明顯。磁帶 666 時段內，高層的風場仍以南風為主，底層以東風為主，和前一時段最大的差別在於 6 至 8 公里處之風場隨著時間有順時針方向的旋轉，即由南風逐漸轉成西風。雖然磁帶 666 和 667 之間有 90 分鐘的間隔，但我們可以看到該高度之西風逐漸增強。在磁帶 667 之時段，在 6 至 8 公里之西風逐漸向上擴張，終將原來由南風主控的局勢再逐漸恢復成為高空西風帶。由此圖可以看出，在 6 公里以上之高度，風場做順時針方向旋轉的原因在於西風帶的恢復，其中所牽涉的動力機制及能量交換的問題，將是個極其重要且值得深入研究的課題。

除了瞬時風場之外，在此尚求每卷磁帶之平均風場，及其標準偏差。利用傾斜 SA 測風法，及本次觀測模式，可求得垂直向、朝東向及朝北向此三個不同位置之水平風速。圖 8 及圖 9 為緯向及

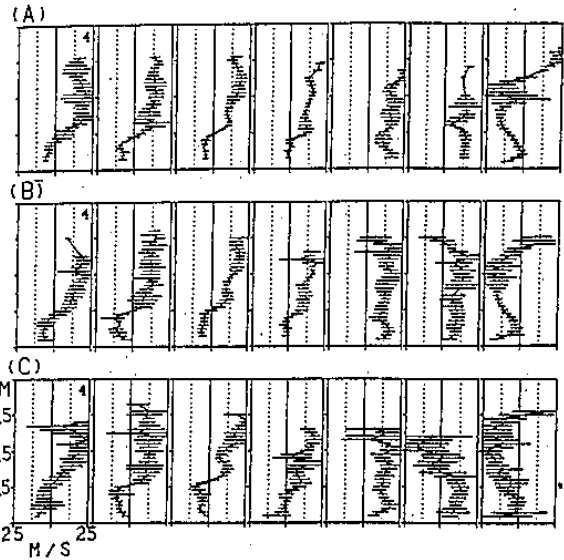


圖 9 如圖 8，但為經向風場。其中 (A) 為垂直向，(B) 為朝東，(C) 為朝北

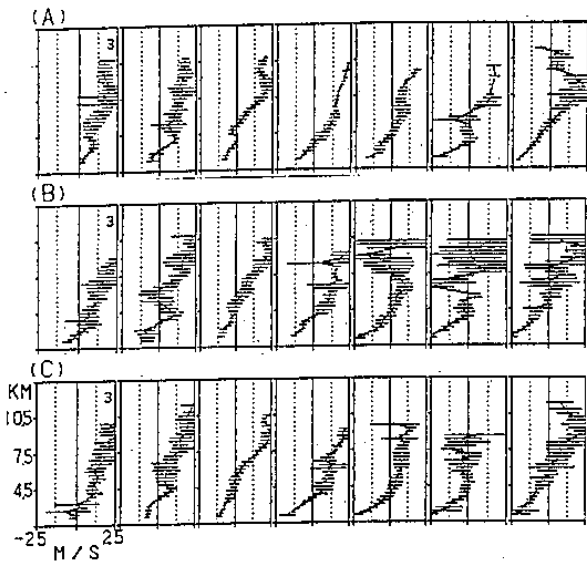


圖 8 A, B, C 三個時段之七卷磁帶之緯向風場之平均值及標準差，其中 (A) 為垂直向，(B) 為朝東，(C) 為朝北之所得。

經向風場，各圖中 (A) 表示垂直向，(B) 表示朝東向，(C) 表示朝北向之風場。(A)、(B) 及 (C) 各行中，由左至右分別代表磁帶 661 至 667 之分析結果。其中以磁帶 663 及 664 兩卷之風場值，其標準偏差較小，且三個位置所得風場趨勢最為一致。

因此次觀測中，每 8 分鐘便有三個不同位置之水平風場。設朝東向之風場為 (U_E, V_E) ，朝北向為 (U_N, V_N) ，而垂直向為 (U_Z, V_Z) 。而 d 為在高度 Z 處，朝東向或朝北向之位置與垂直向所在位置之距離，且 $d = Z \tan 17^\circ$ ，則渦度 χ 及輻散 D 便可寫成下式：

$$\chi = \frac{V_N - V_Z - U_E + U_Z}{d}$$

$$D = \frac{U_E - U_Z + V_N - V_Z}{d}$$

由本次觀測可得，在磁帶 663 時段內，高度 5 公里附近之渦度值約為 $3 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ 。

六、結論

應用傾斜 SA 測風法，並利用中壘特高頻雷達之特性，首次將同一組資料，用 DBS 法和 SA 法求風速，即直接對不同測風法加以比較。證明此二種測風法所得之風速，有很好的相關。

另外，亦首次提出利用一座雷達測渦度的方法，並測得中、小尺度的渦度及輻散。其結果可由渦度方程加以解釋。

本節亦討論到動量通量在大氣環流上所扮演之重要角色，並提出新的測量方法。經證明，其結果和 Vincent 和 Reid (1983) 所提之測量法頗為吻合。利用本節所提之測量法將比 Vincent 和 Reid 之測法直接，且其假設亦少。

對颱風之觀測亦為本文之特色，在時間解析度方面，發揮了特高頻雷達之優點，是探空氣球所不能及的。

在本節之觀測中，大多限於對流層內，其原因在於中壘特高頻雷達之發射功率不足。此問題限制了對更高層大氣之研究，實屬遺憾。希望在新的年度計劃中，能解決此問題，則中壘特高頻雷達將有更進一步之成就。

REFERENCES

- Briggs, B.H., G.J. Philips and D.H. Shinn, The analysis of observations on spaced receivers of the fading of radio signals, *Proc. Phys. Soc.* B63(2), 106-121, 1950.
- Briggs, B.H., The analysis of spaced sensor record by correlation techniques, in *MAP Handbook*, vol. 13, 166-186, 1984.
- Farley, D.F., H.M. Ierkić, and B.G. Fejer, Radar interferometry : A new technique for studying plasma turbulence in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, p1467-1472, 1981.
- Geller, M.A., Technique for studying gravity wave and turbulence (keynote paper), *Handbook for MAP*, Vol. 9, p241-246, 1983.
- Holton, J.R., *An introduction to dynamic meteorology*, 391pp., 1979.
- Holton, J.R., and X. Zhu, A further study of gravity wave induced drag and diffusion in the mesosphere, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 41, p2653-2662, 1984.
- Larsen, M.F., Applications of MST radars: meteorological applications, lecture notes, *International School on Atmospheric Radar*, Ed. S. Fukao, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 1988.
- Liu, C.H., J. Röttger, G. Dester, S.J. Franke, and C.J. Pan, The Oblique Spaced Antenna Method for Measuring Atmospheric Wind Field, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, in press, 1990b.
- Röttger, J., and H.M. Ierkić, Postset beam steering and interferometer applications of VHF radar to study winds, waves and turbulence in the low and middle atmosphere, *Radio Sci.*, Vol. 20, p1461-1480, 1985.
- Vincent R.A., and J.M. Reid, Radar measurement of gravity wave momentum fluxes, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 40, p1321-1333, 1983.
- Woodman, R.F., and A. Gullen, Radar observations of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 31, p493-505, 1974.

The Development and Applications on the Wind Probing Techniques by Using Chung-Li VHF Radar

C. J. Pan* C. H. Liu** P. L. Lin*

* Institute of Atmospheric Physics,
National Central University

** Institute of Space Science,
National Central University

ABSTRACT

Using the Chung-Li VHF radar to probe the wind, we can investigate the wind field of the atmosphere. In this text we introduce the wind probing methods, and the methods to measure the momentum flux, vorticity and divergence. At last, we use these techniques to investigate the Typhoon Susan.