

氣象雷達簡介以及在 劇烈天氣監測與研究上的應用

廖宇慶

雷達氣象實驗室
國立中央大學大氣科學系

2019/01/15

水保局技術研究發展小組



Outline

1. 氣象雷達的基本介紹。
2. 台灣氣象雷達的現狀。
3. 台灣雷達氣象的研究與應用。
4. 氣象雷達用於定量降雨估計與預報。
5. 未來發展。



RAdio **D**etection **A**nd **R**anging (**RADAR**)

二次大戰時由美軍取名

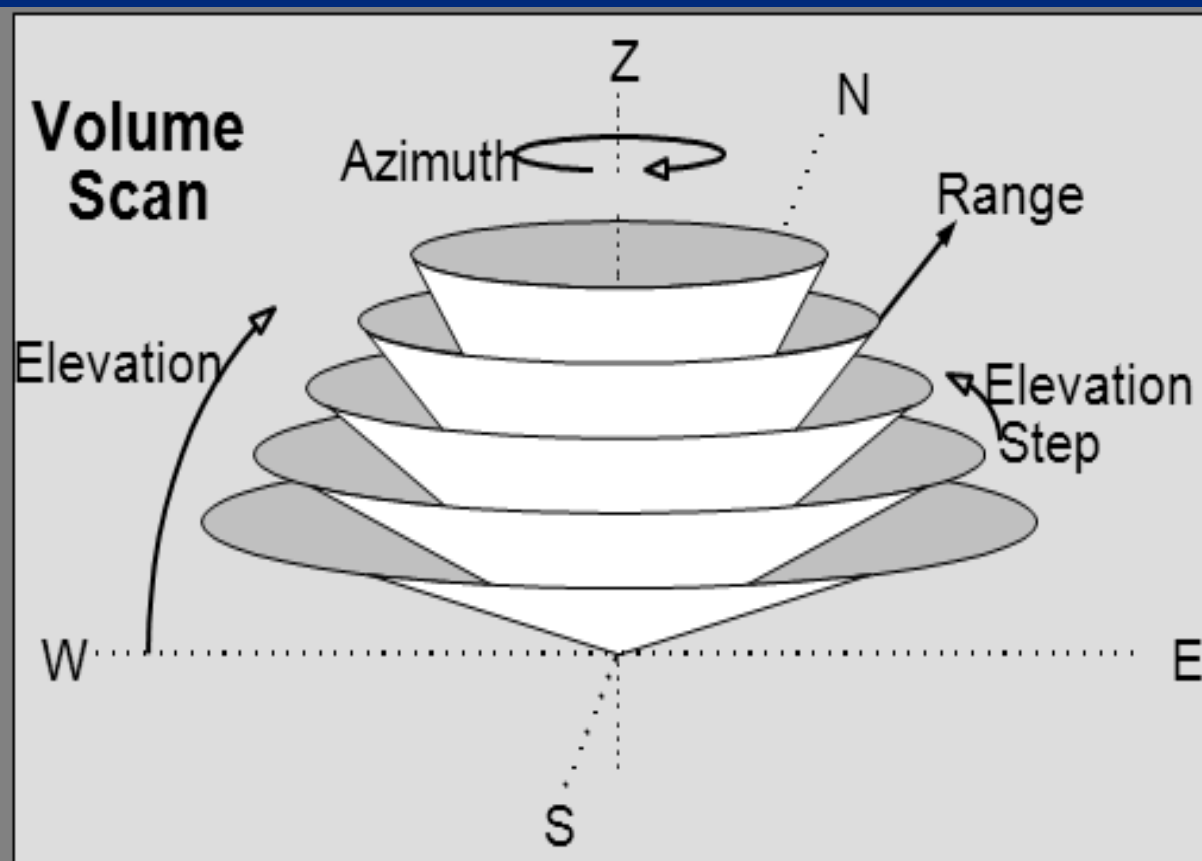


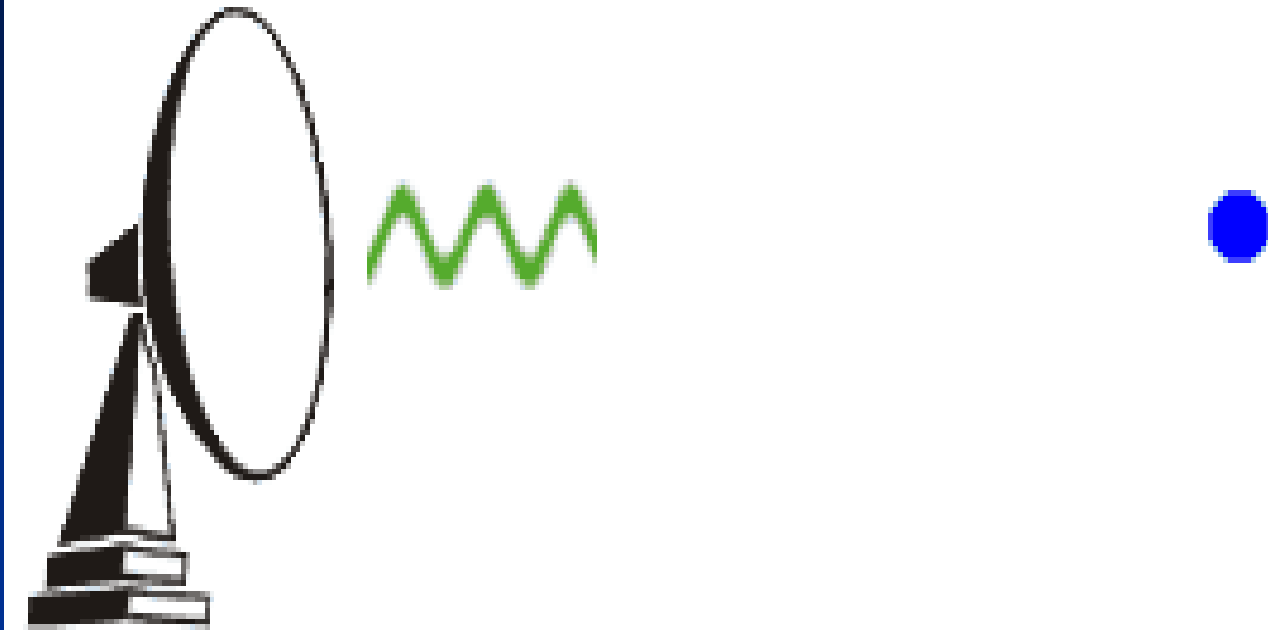


雷達天線

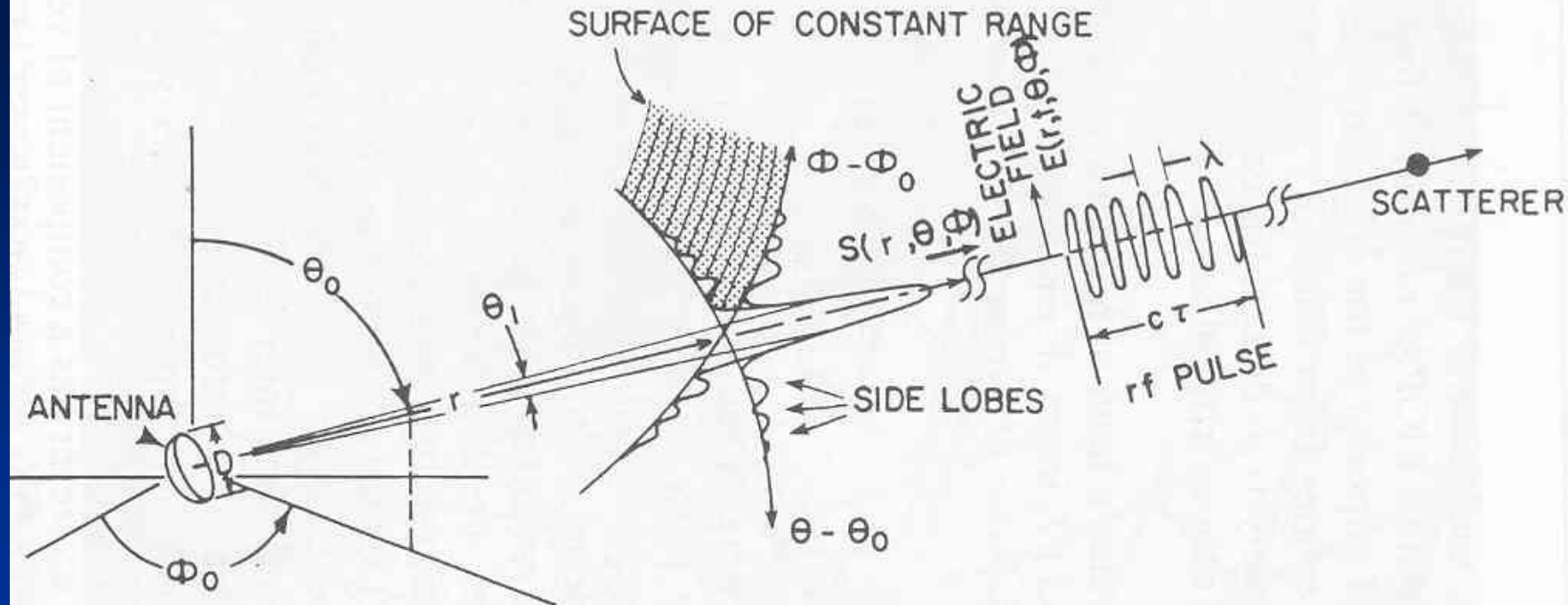
雷達體積掃描

(例: VCP 21: 0.5° , 1.5° , 2.4° , 3.4° , 4.3° ,
 6.2° , 10.0° , 14.0° , 19.5°)





雷達會主動發射電波，藉由分析反射回來的回波，得知大氣的狀態。雷達是偵測當時的天氣，但可以利用雷達資料改進對未來天氣的預報。



氣象雷達常用的電磁波波長

λ : 3 cm (X-band)

5 cm (C-band)

10 cm (S-band)

氣象雷達常用波長與比較

- **S-band**：波長約 10 cm，訊號衰減輕微，觀測範圍可達400~500公里，通常用於長距離大範圍內劇烈天氣的監測，但天線要很大(~9.0 m)。中央氣象局擁有此型雷達。
- **C-band**：波長約 5 cm，觀測範圍約100~200公里，通常架設於機場負責飛航安全。
- **X-band**：波長約 3 cm，訊號容易衰減，尤其在大雨中，觀測範圍約50~100公里，但可用較小的天線，故可置於移動平台。





左邊是一部S-band雷達，右邊是一部X-band雷達

From 許皓淳 (CWB)

氣象雷達可以觀測的變數

由反射的能量得到回波

(天氣系統的位置與降雨強度的定性資訊)

由都卜勒效應得到降水粒子的移動速度

(天氣系統內的風場分布資訊)

由雙偏極化功能得到雨滴大小分布

(降雨強度的定量資訊)



回波（代表被雨滴反射能量的強弱）

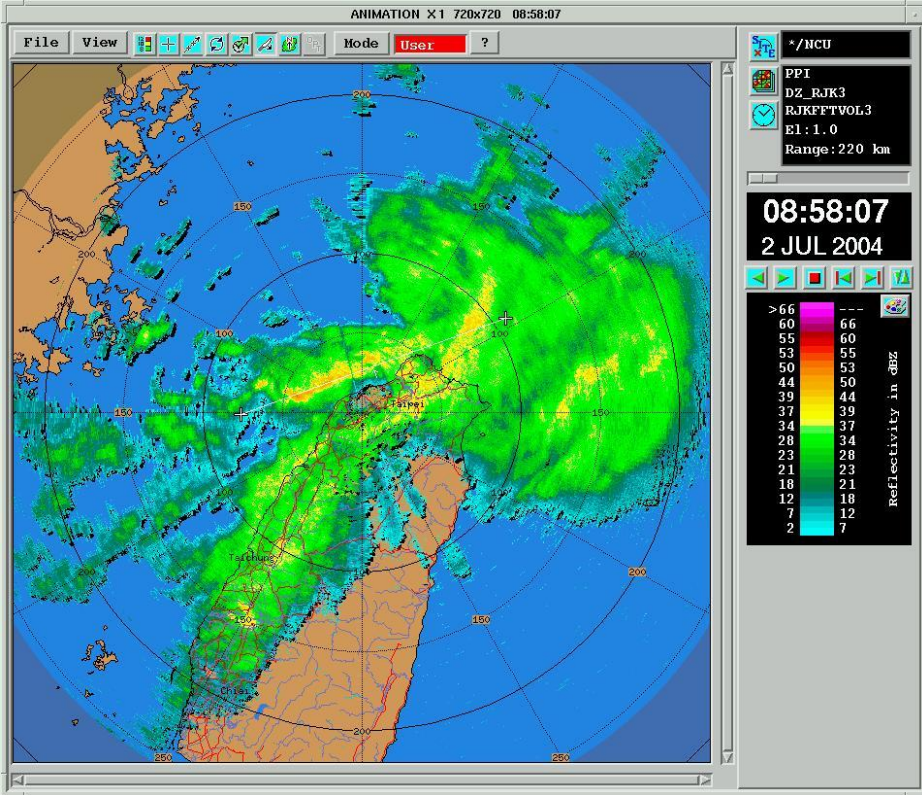
雷達方程式

$$P_r = P_t \frac{g^2 \lambda^2 f^4 (\theta, \phi)}{(4\pi)^3 r^4 l^2} \sigma_b$$

P_t : 發射出去的能量

P_r : 接收到的能量





回波可定性的描述 降雨的強度

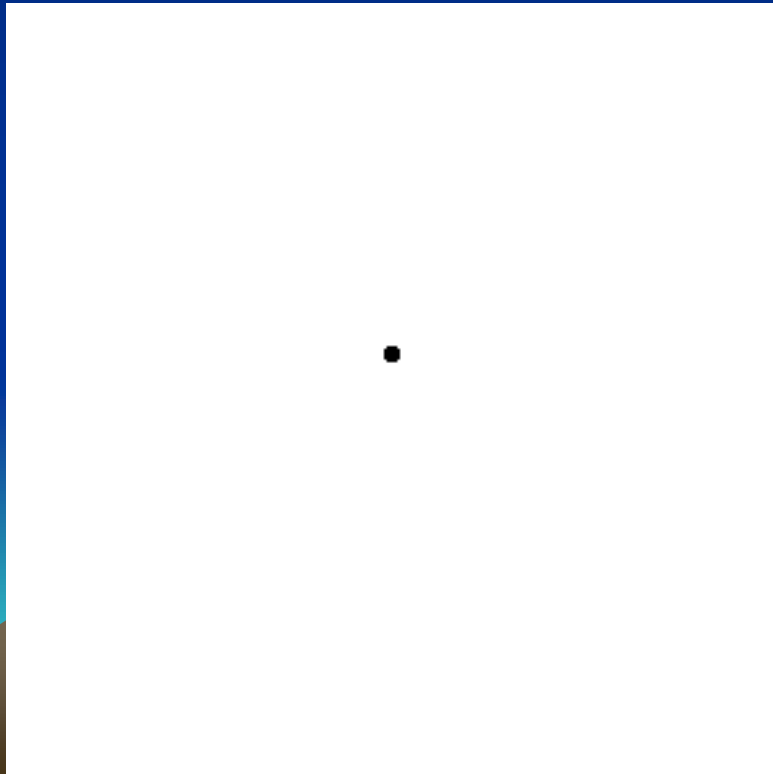


$$\text{距離} = \frac{\tau_s \times \text{光速}}{2}$$

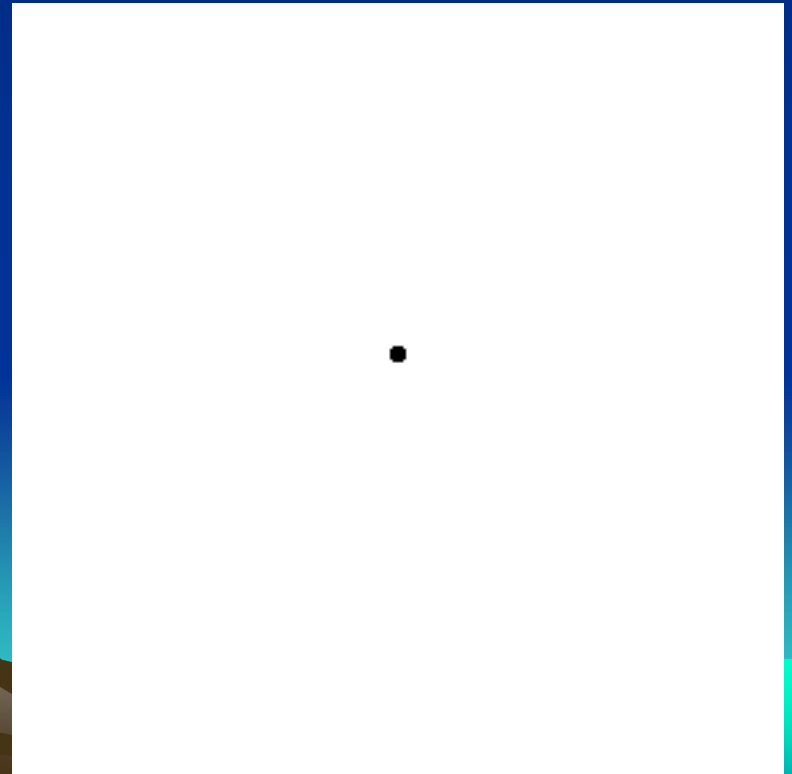
都卜勒效應

- 電磁波打到在運動中的降雨粒子時，反射波的頻率會改變，而改變的量(都卜勒位移)與粒子的速度有關。

波源靜止時



波源運動時



都卜勒位移(f_d)與徑向風(V_r)的關係式

$$f_d = \frac{-2}{\lambda} V_r$$

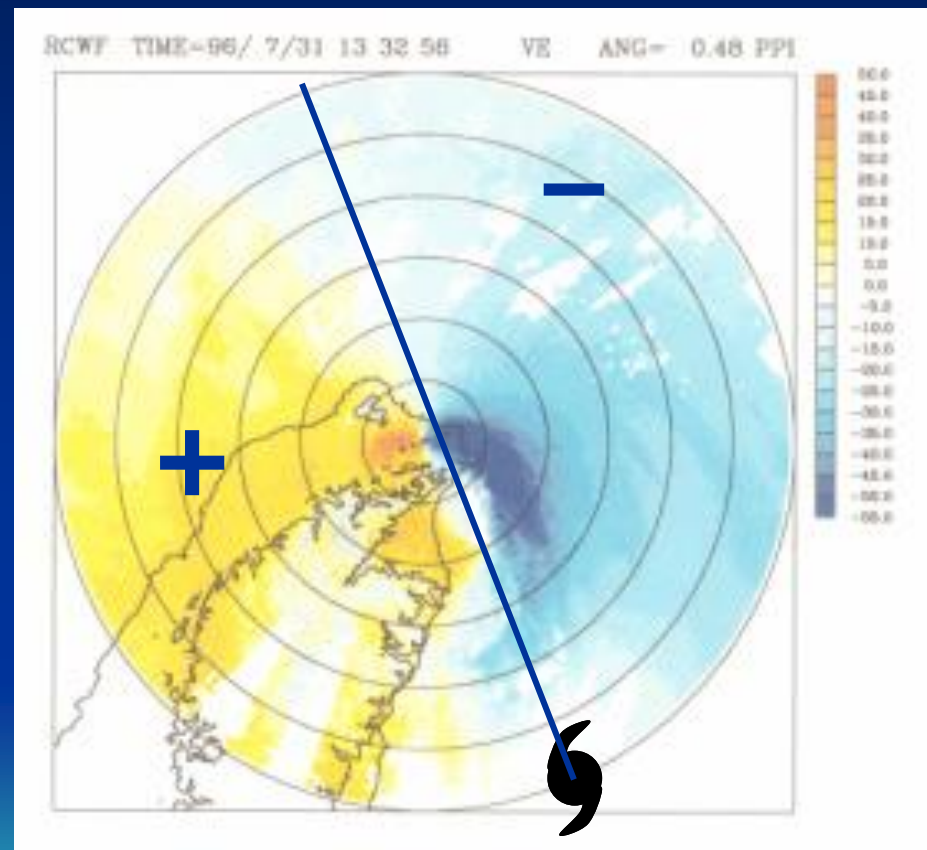
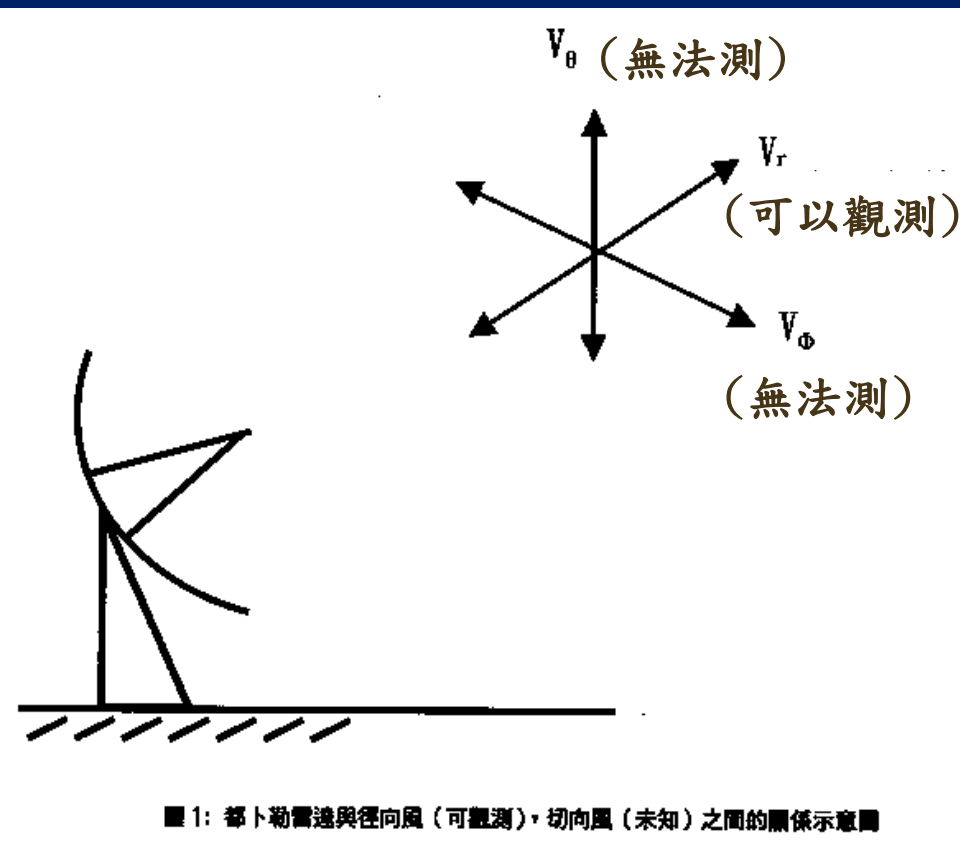
徑向風 (V_r)：沿天線指向方向的風場分量，
稱之為徑向風，雷達只能測得這個分量。

正 V_r ：代表風向是吹離雷達

負 V_r ：代表風向是吹向雷達



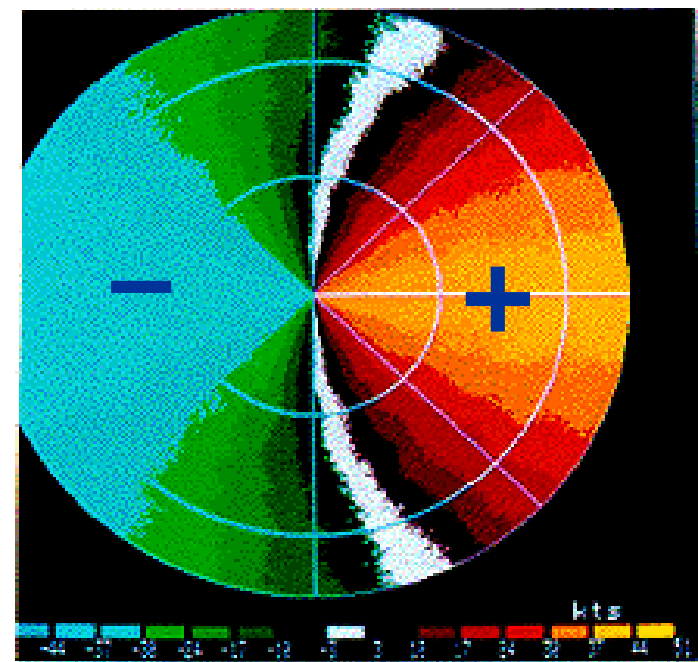
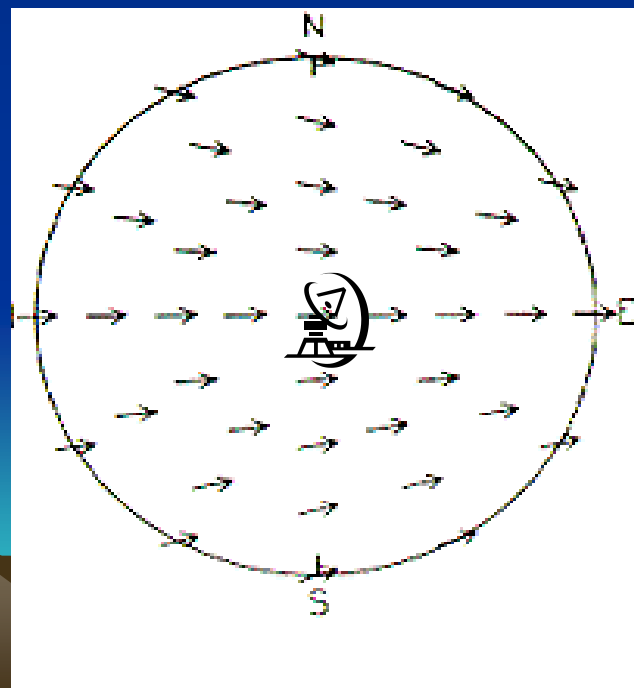
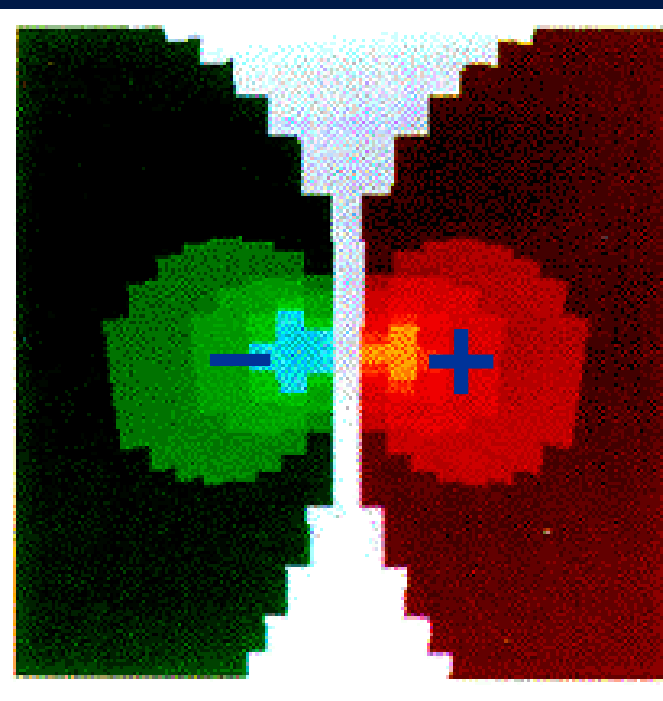
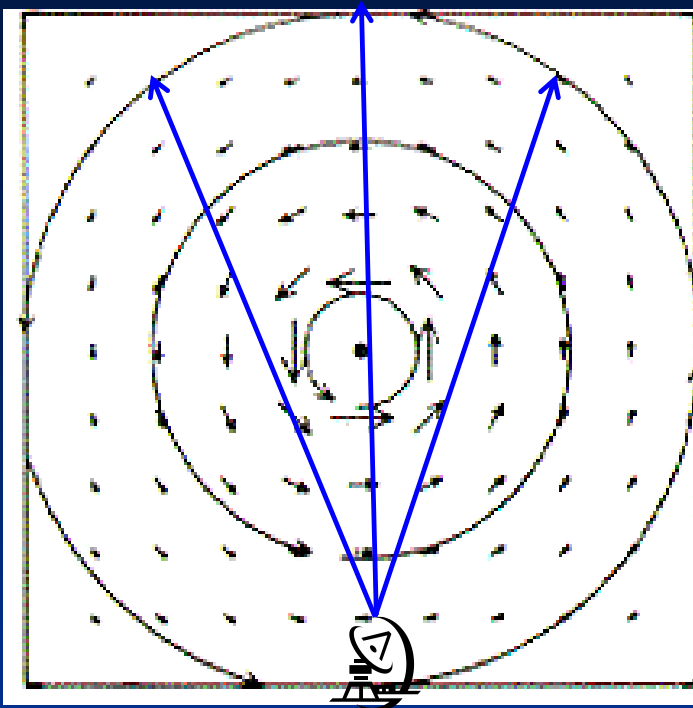
都卜勒雷達觀測的徑向風



徑向風=0 通常代表的意義是：

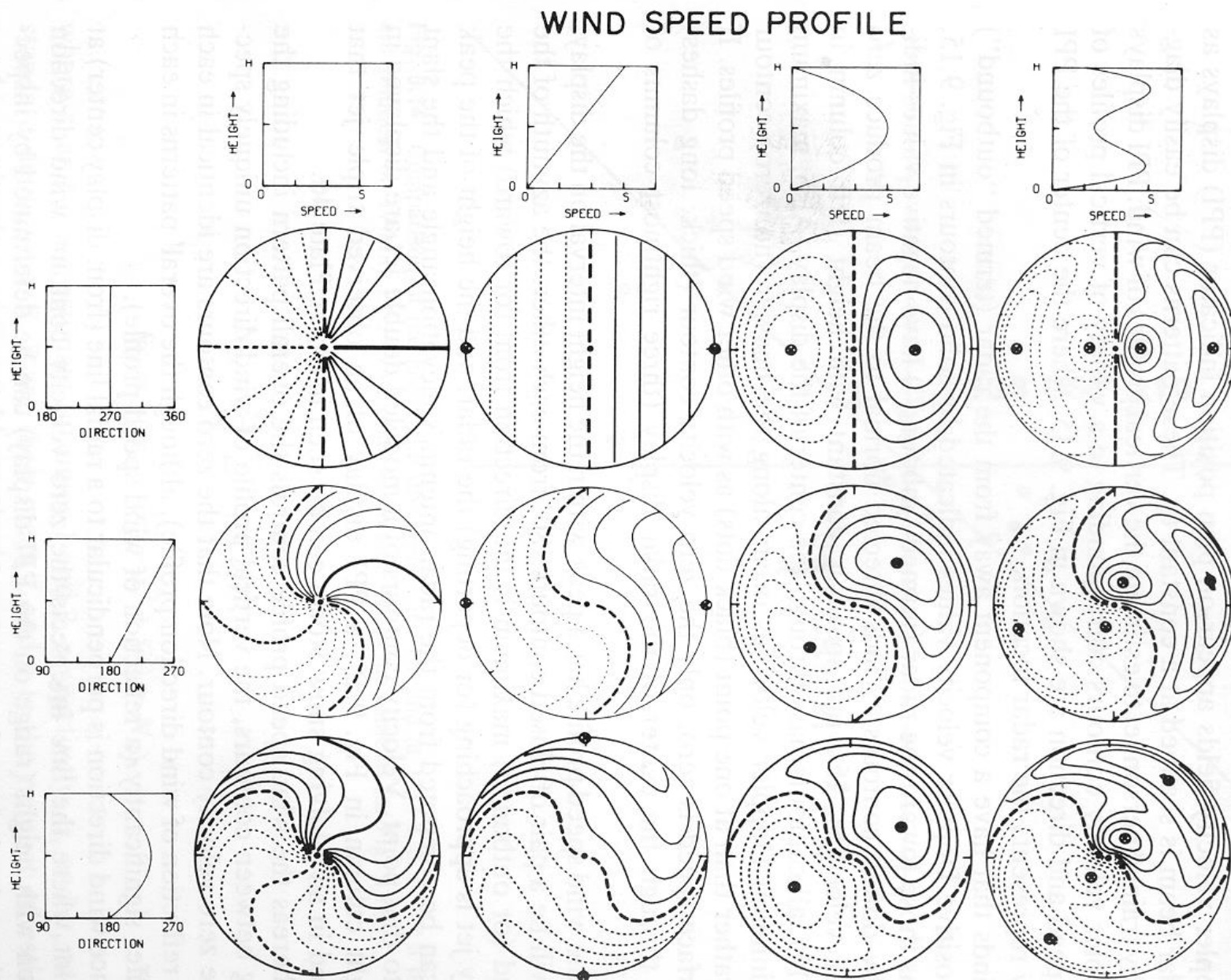
- (1)該點的風向與天線指向的方向互相垂直。
- (2)電磁波打到地面上的障礙物。
- (3)通常不代表該點的風是靜止的。





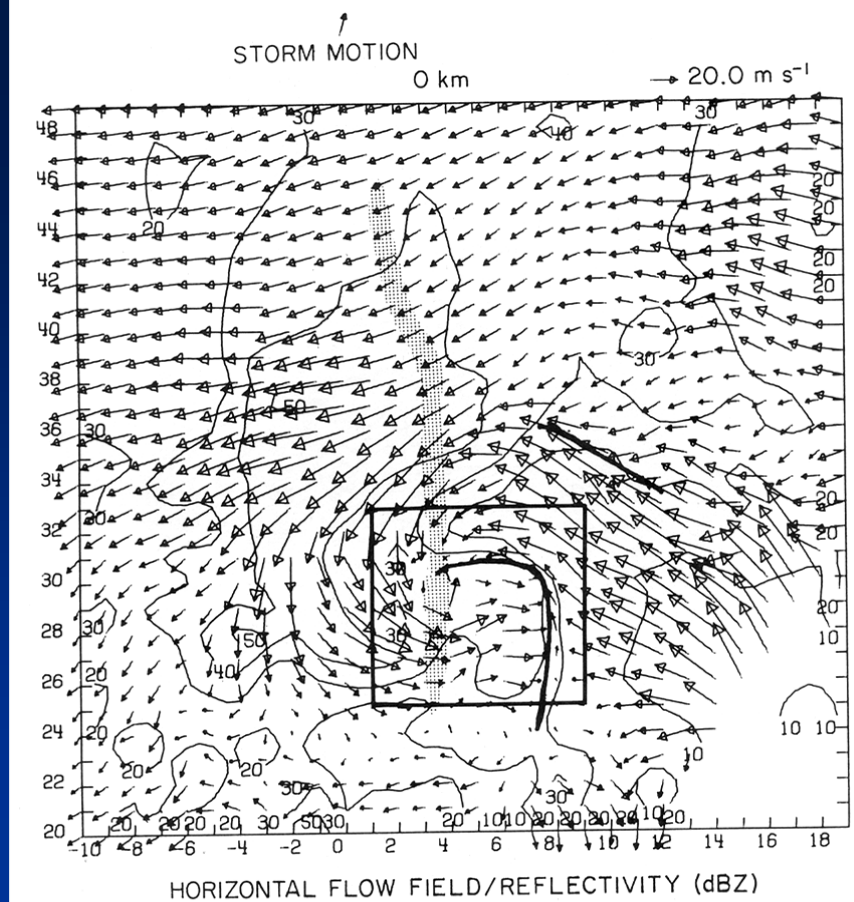
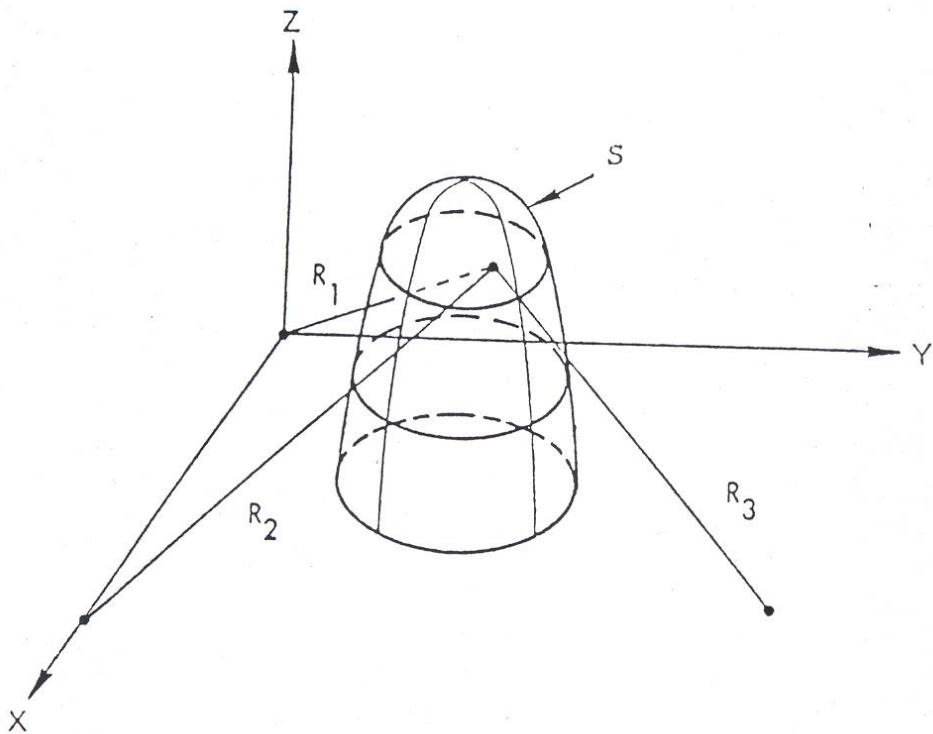
由單一雷達的徑向風推斷真實大氣風場結構有一定的難度

WIND DIRECTION PROFILE

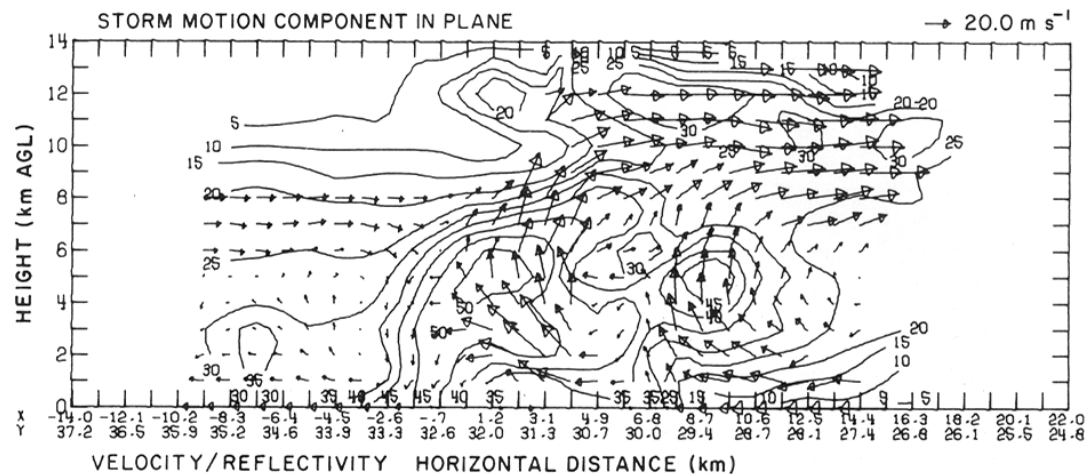


MAY 1969

LARRY

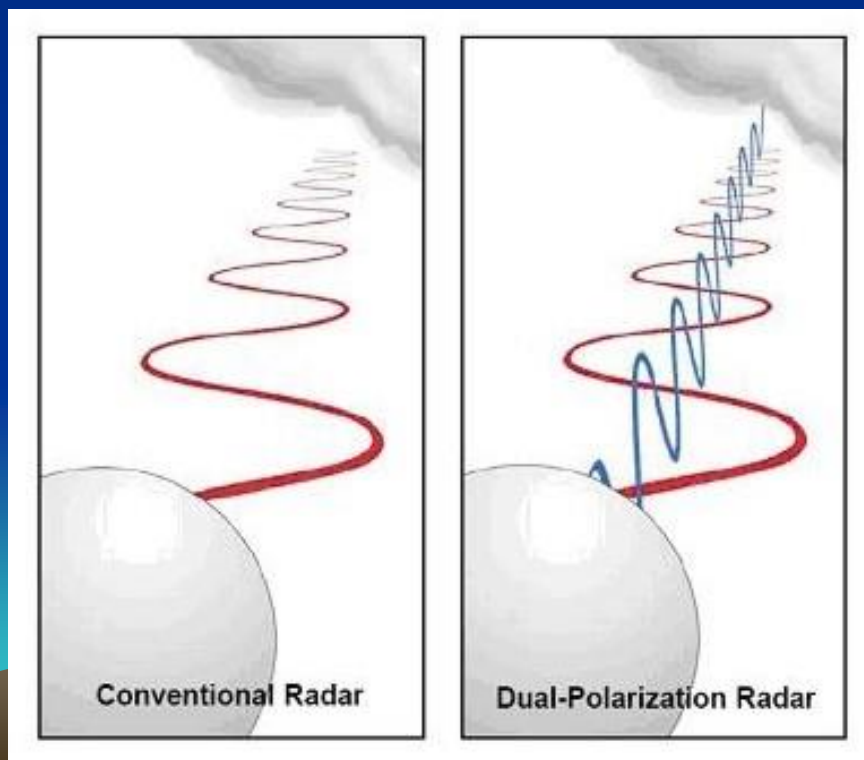


多部都卜勒雷達合成風場



雙偏極化雷達 (dual-Polarimetric radar)

- 偏極化：
 - 電磁波傳遞時電場振盪的方向。
- 雙偏極化雷達：
 - 發射水平、垂直偏極化方向的電磁波來做觀測。



台灣陸基雷達網



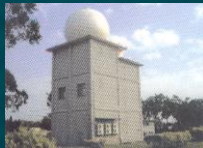
NCU(C-POL)

RCWF/RCMD

臺灣本島衛星影像地圖

RCTP

RCCK



RCTC

RCPH

RCCG



RCLY

NarLabs

RCHL



RCGI

RCKT



氣象局 (S) (4)

氣象局 (C) (3)

中大 (C) (1)

空軍(C) (3)

民航局 (C) (1)

國研院 (C) (1)

總共 (13)

在2~3年內將再興建三座雙偏極化降雨雷達。

五分山雷達站





花蓮雷
達站

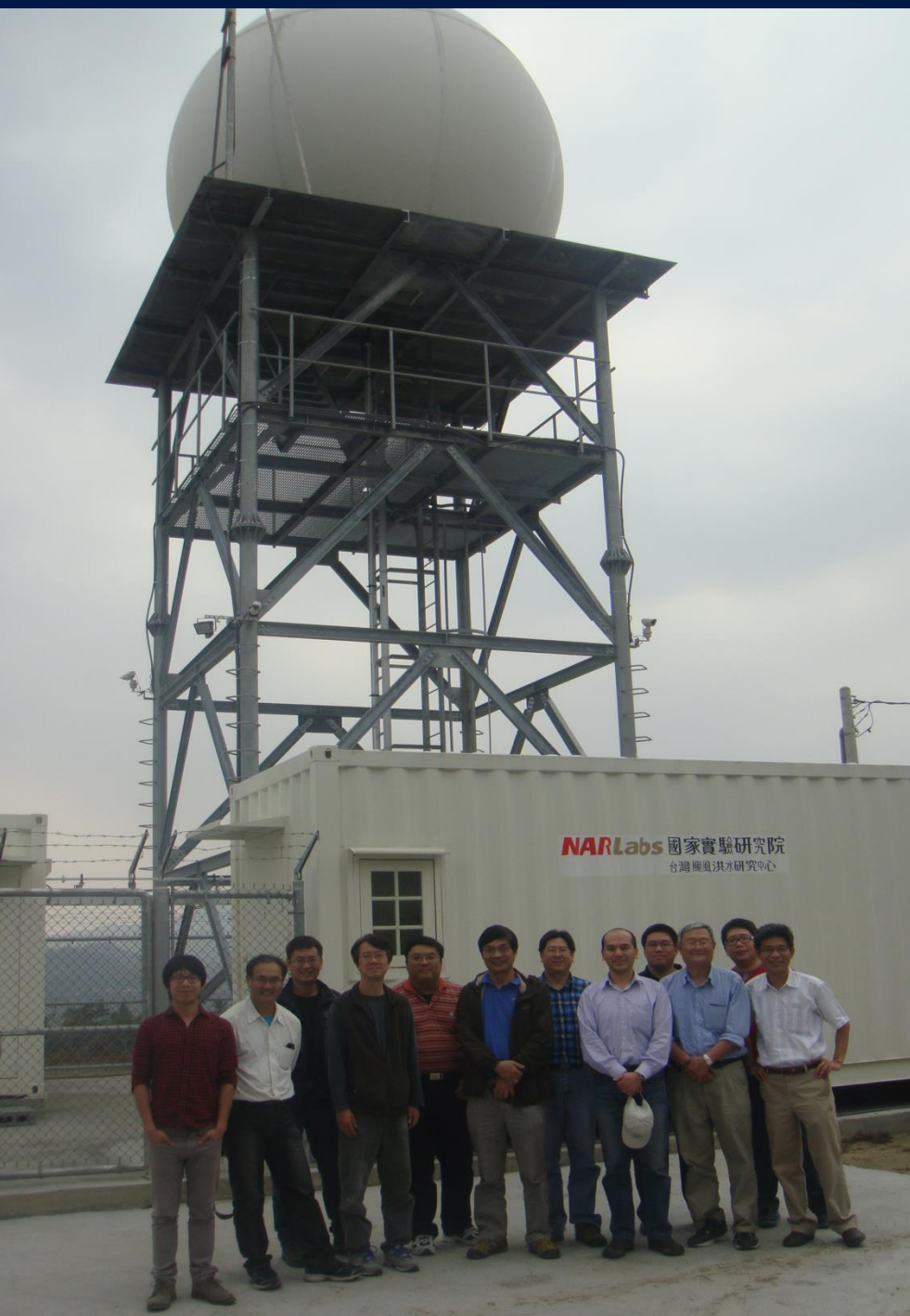




墾丁雷達站

七股雷達 站





國研院
高雄杉林
C-band dual-pol
氣象雷達



中央氣象局
高雄林園雷達
C-band dual-pol



中央氣象局
台中南屯雷達
C-band dual-pol
(台灣雷達網最新的成員)

台灣雷達氣象主要之研究與應用項目

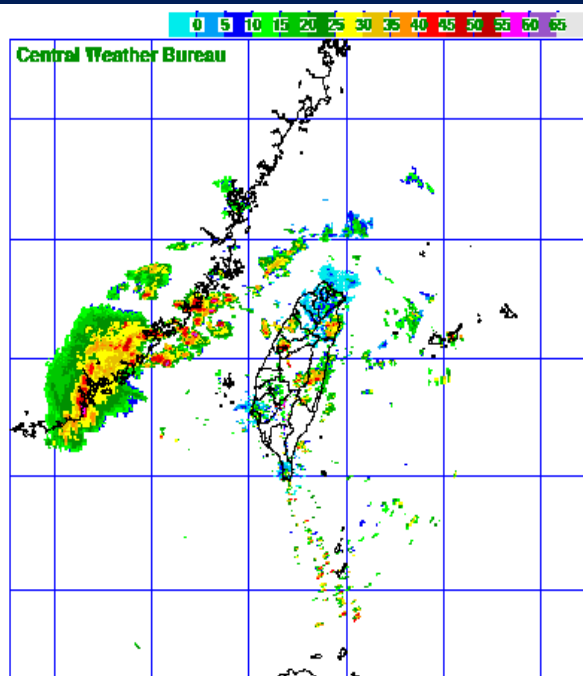
- 劇烈天氣之即時監測與預警
- 劇烈天氣系統的結構特徵與演化
- 地形效應與地形引發強降水
- 熱帶對流系統與午後強降雨機制
- 雷達資料反演與同化
- **定量降水估計與預報**
- 雙偏極化雷達與雲物理研究
- **雷達氣象與水文防災減災之結合**



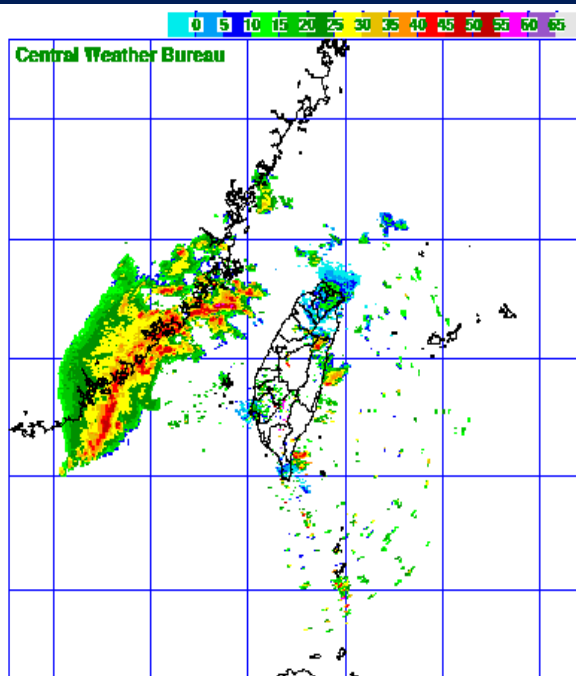
氣象雷達可以提供高時間(< 10分鐘)與空間(< 1 公里)解析度的三度空間觀測資料，因此是針對劇烈天氣系統，進行即時監測非常有用的設備。



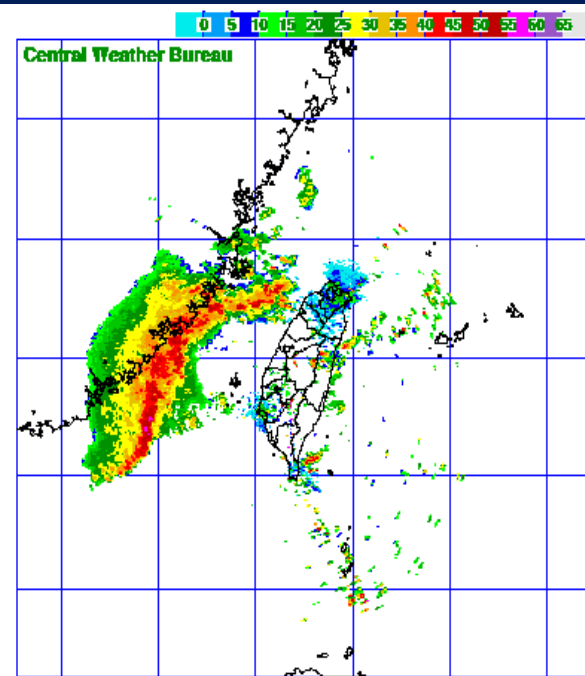
即時監測降雨系統的強度與動態



MOSAIC CV(dBZ) 14:00TST 02-APR-07



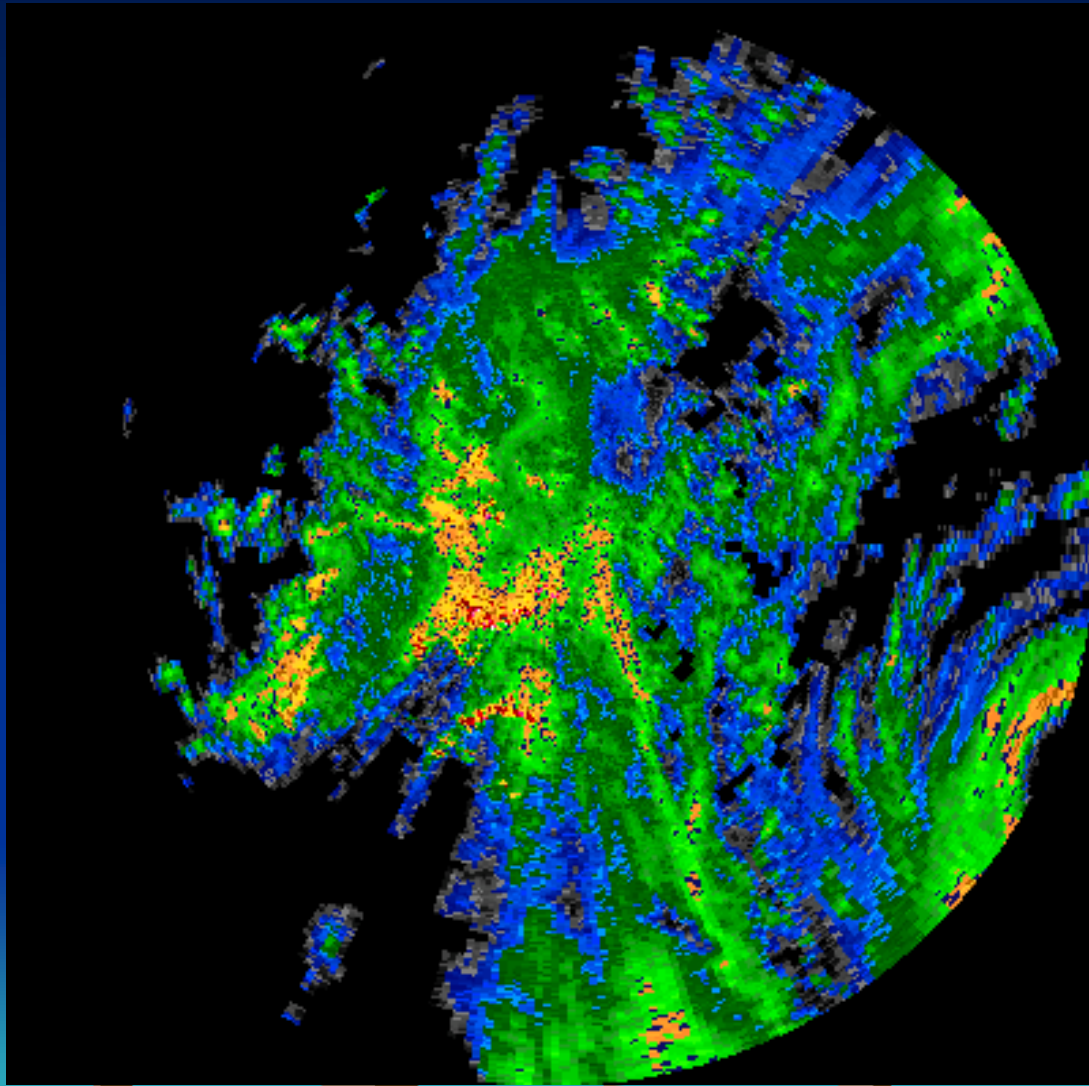
MOSAIC CV(dBZ) 15:00TST 02-APR-07



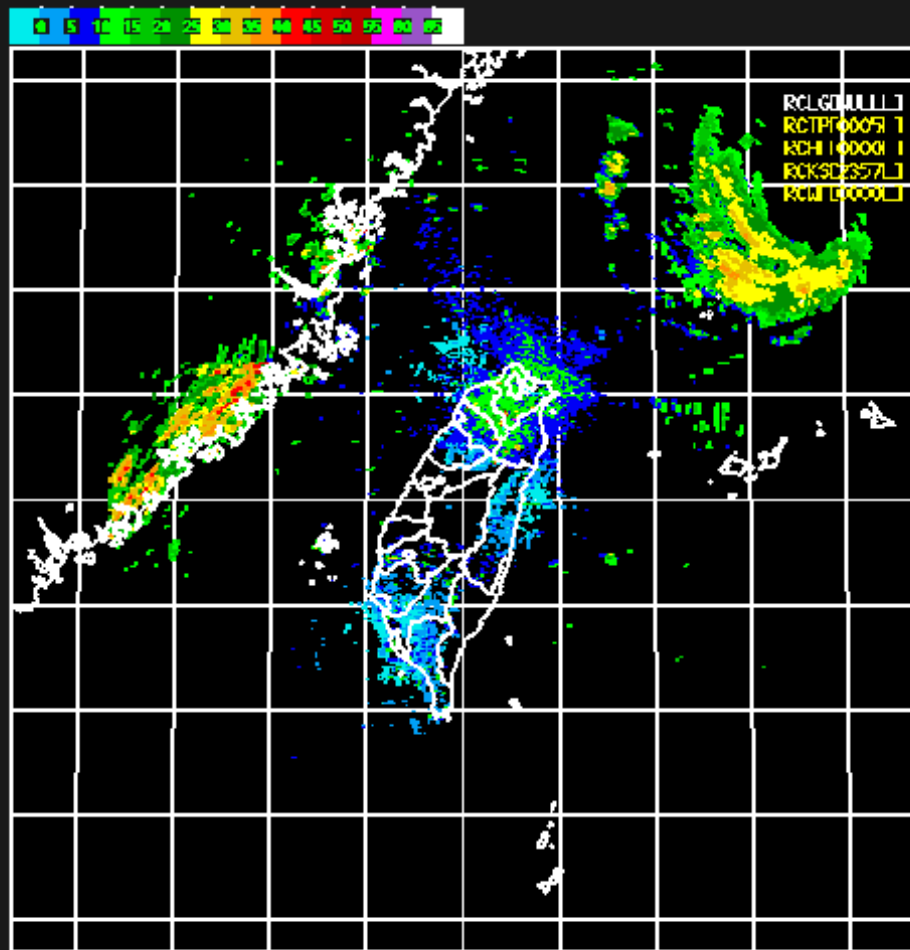
MOSAIC CV(dBZ) 16:00TST 02-APR-07

強回波持續靠近台灣，降雨預計由北部開始

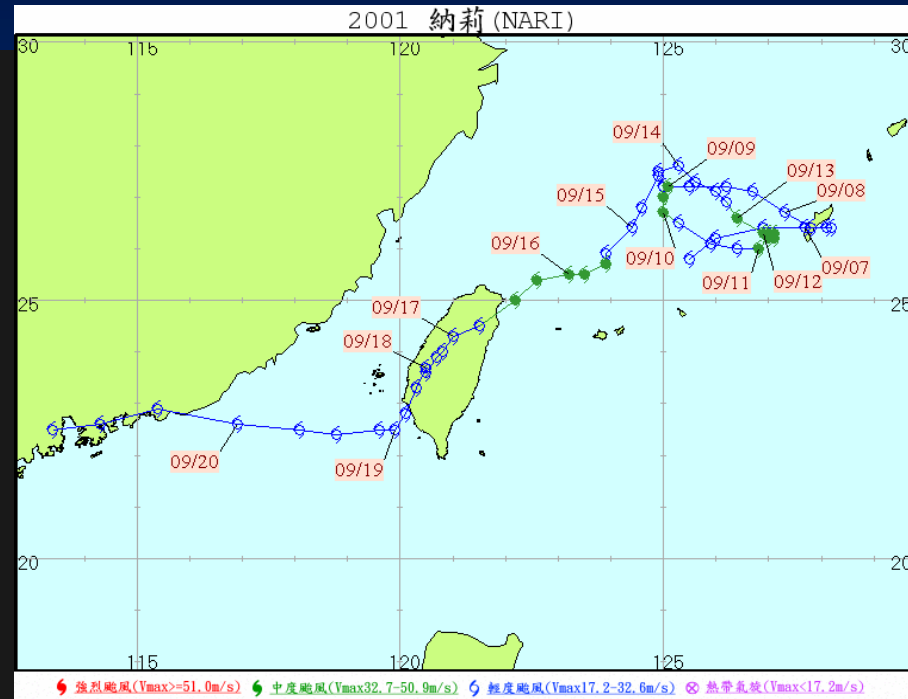
1996年7月31日-8月1日 賀伯颱風



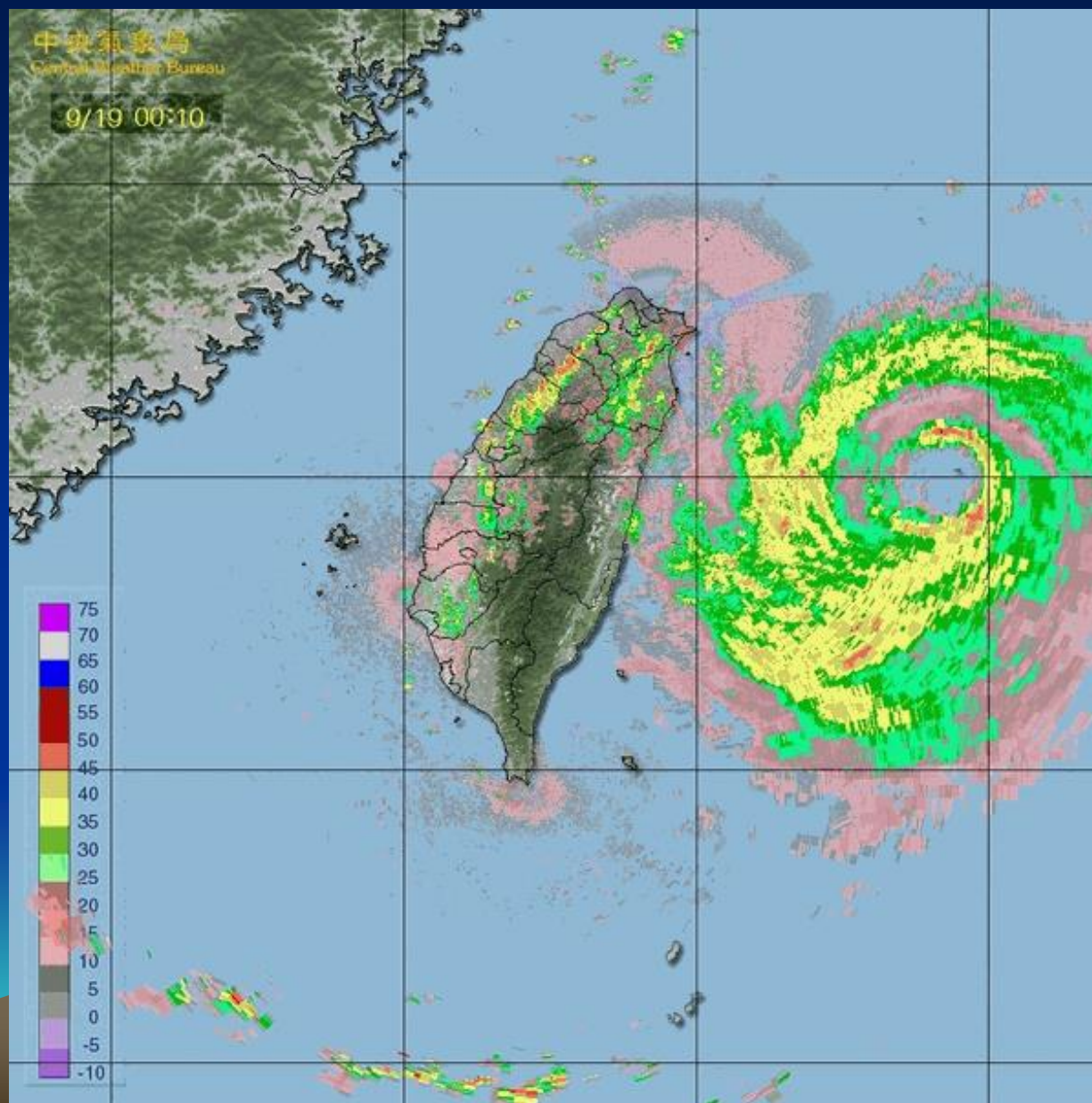
Typhoon Nari (2001/9/16-19)



MOSAIC CY(dBZ) 00:00L 15-SEP-01



2010年9月17-20日 凡那比颱風(回波場)



如何估計降雨量？

定量降雨估計(QPE)

(Quantitative Precipitation Estimation)

估計發生在某地**現在的降雨量**(mm/hr)

(a)**使用雨量筒**

(b)使用雷達回波

(c)使用雷達回波+雨量筒網

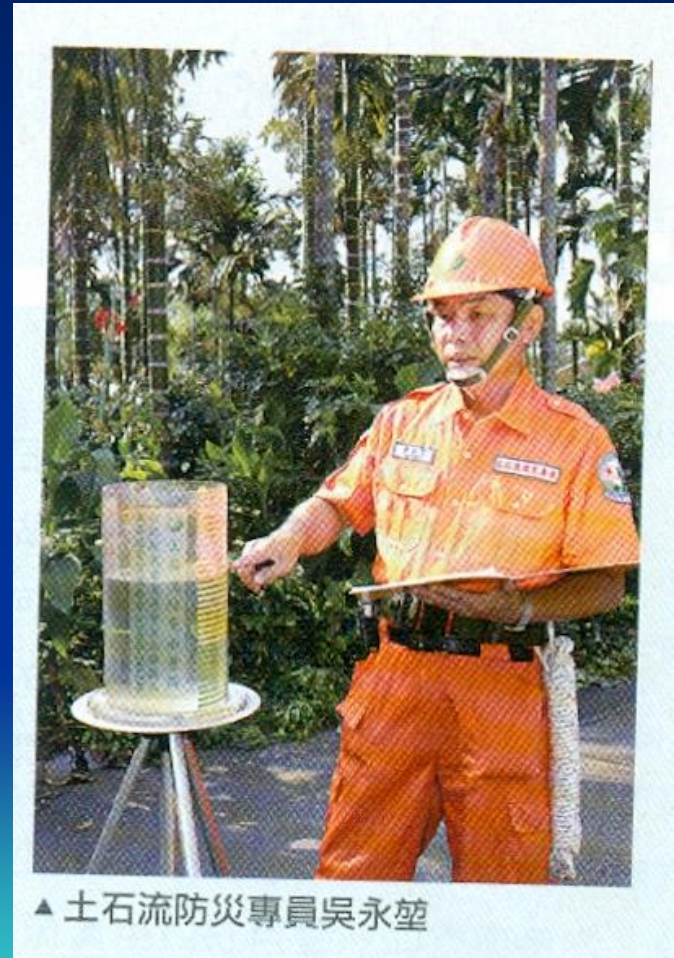
(d)使用雷達回波+雨滴譜儀

(e)使用雙偏極化雷達



雨量筒直接量測單點的降雨，可用來監測降雨是否超過某個警戒值，作為發出預警或撤離的參考。

（如：農委會水保局的土石流防災專員）。



▲ 土石流防災專員吳永堃

氣象雷達可提供面的觀測，
在定量降雨估計上的應用可以
扮演很重要的角色。



如何估計降雨量？

定量降雨估計(QPE)

(Quantitative Precipitation Estimation)

估計發生在某地**現在的降雨量**(mm/hr)

(a)使用雨量筒

(b)**使用雷達回波**

(c)使用雷達回波+雨量筒網

(d)使用雷達回波+雨滴譜儀

(e)使用雙偏極化雷達



只用雷達回波的定量降雨估計 (Z-R relation)

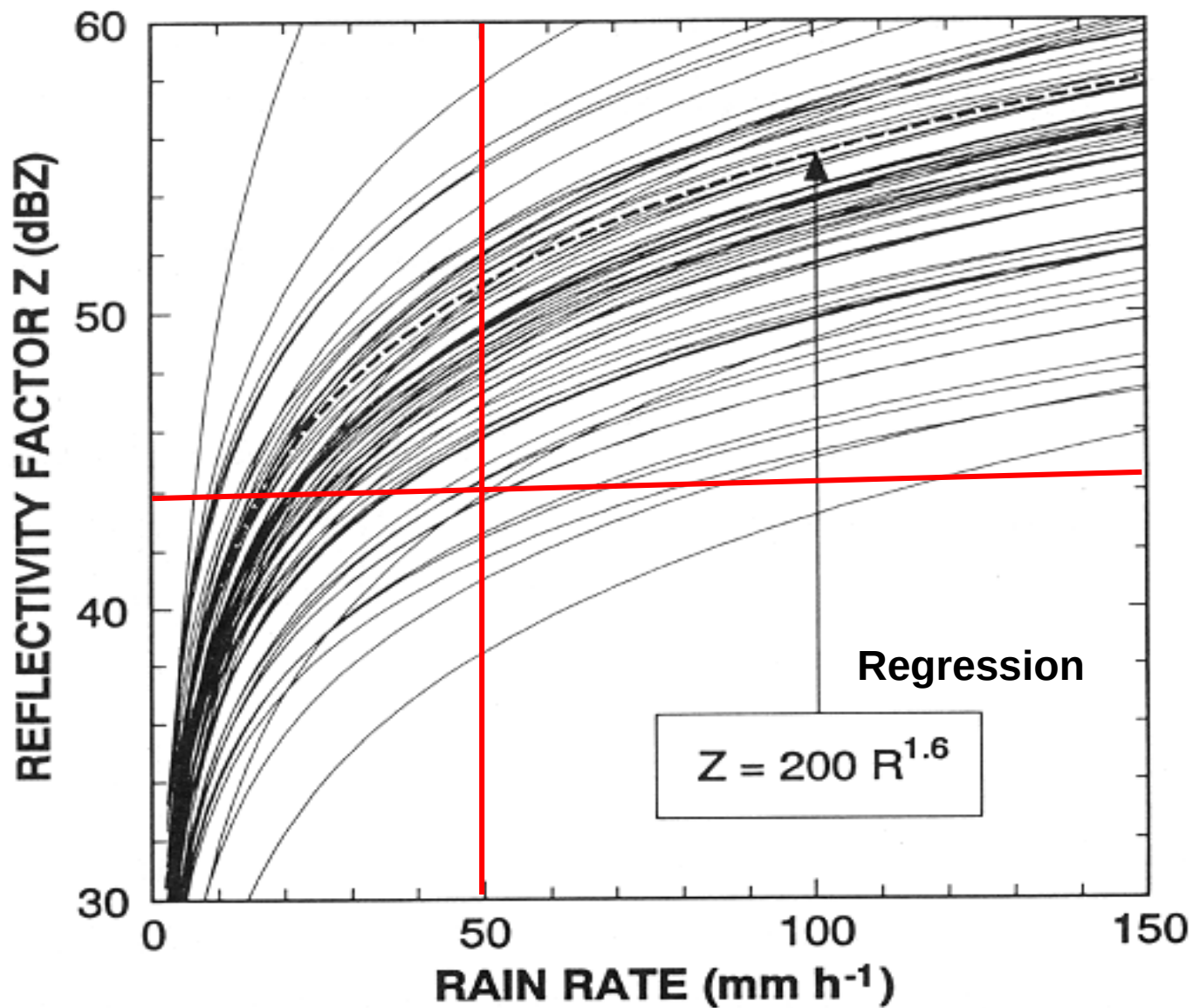
$$Z=AR^b$$

如: $Z=300R^{1.4}$

Z: 雷達回波

R: 降雨率

但A, b 係數不是固定值 !



Z和R的對應關係不是唯一的！

Example:

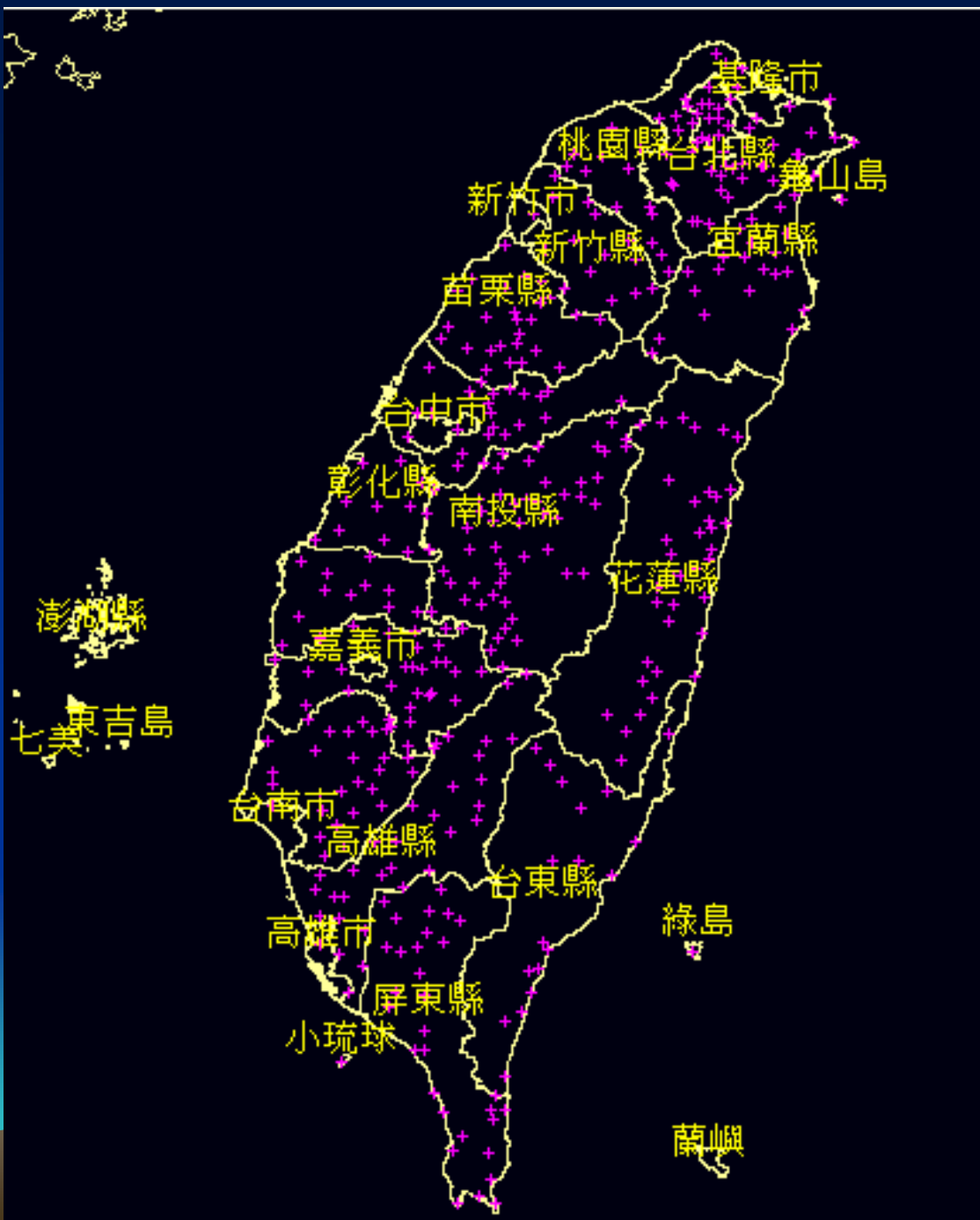
1,000 顆直徑 1.0 mm 的雨滴會和 100 顆直徑 1.47 mm 的雨滴產生相同強度的回波(Z)。

但前者會產生 7.12 mm/hr 的降雨率(R)
後者會產生 2.91 mm/hr 的降雨率(R)



要準確的估計降雨，必須知道某個直徑大小的雨滴有多少個，稱之為**雨滴粒徑分佈**(Drop Size Distribution; DSD)，但是雷達回波無法呈現這個資訊，因此在估計降雨時會出現誤差。





台灣雨量筒網 ~ 500 sites

定量降雨估計

雷達回波 + 雨量筒網

如何估計降雨量？

定量降雨估計(QPE)

(Quantitative Precipitation Estimation)

估計發生在某地**現在的降雨量**(mm/hr)

(a)使用雨量筒

(b)使用雷達回波

(c)**使用雷達回波+雨量筒網**

(d)使用雷達回波+雨滴譜儀

(e)使用雙偏極化雷達



$G=50$
 $R=30$
 $G-R=20$

$G=63$
 $R=37$
 $G-R=26$

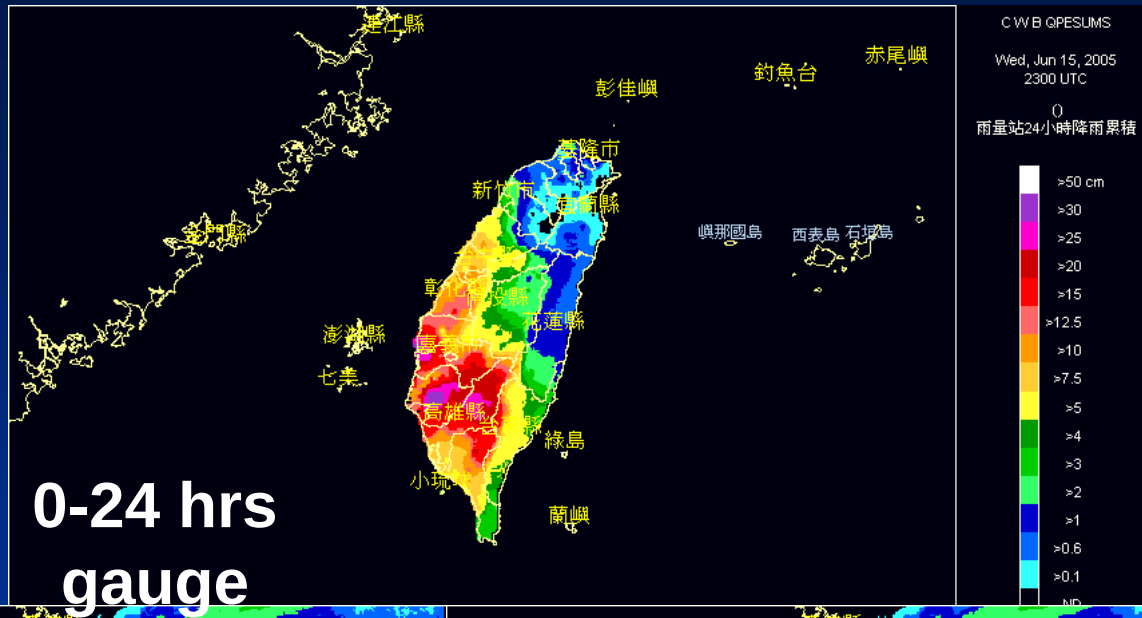
$G=75$
 $R=45$
 $G-R=30$



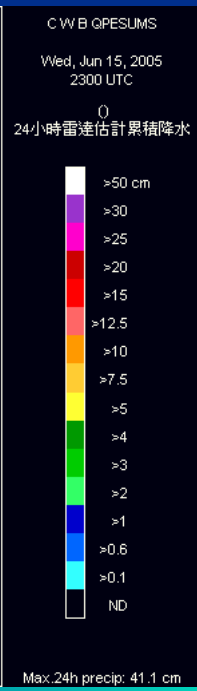
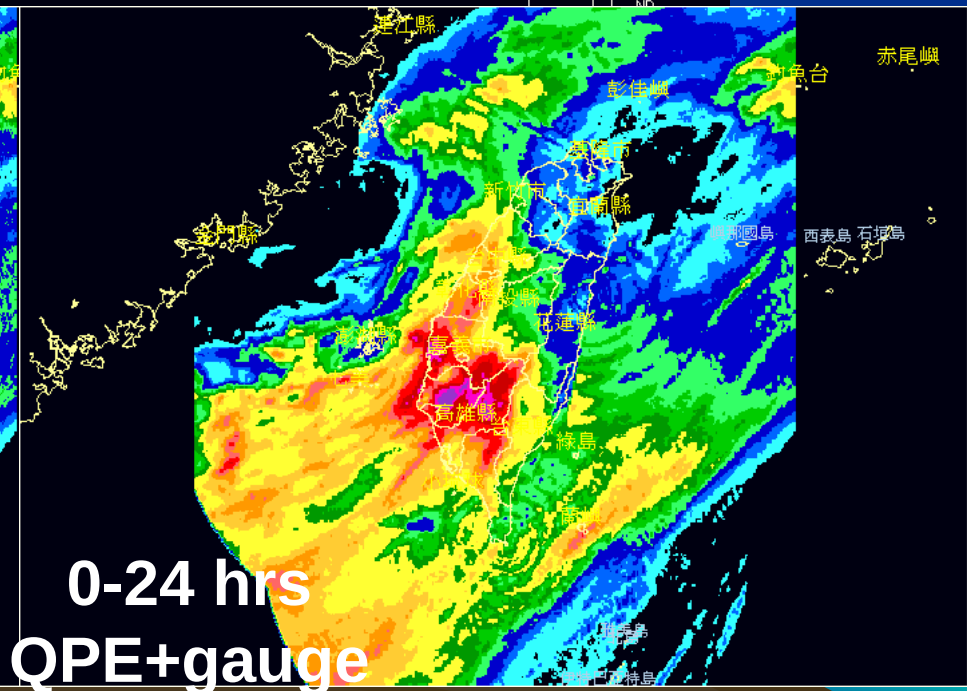
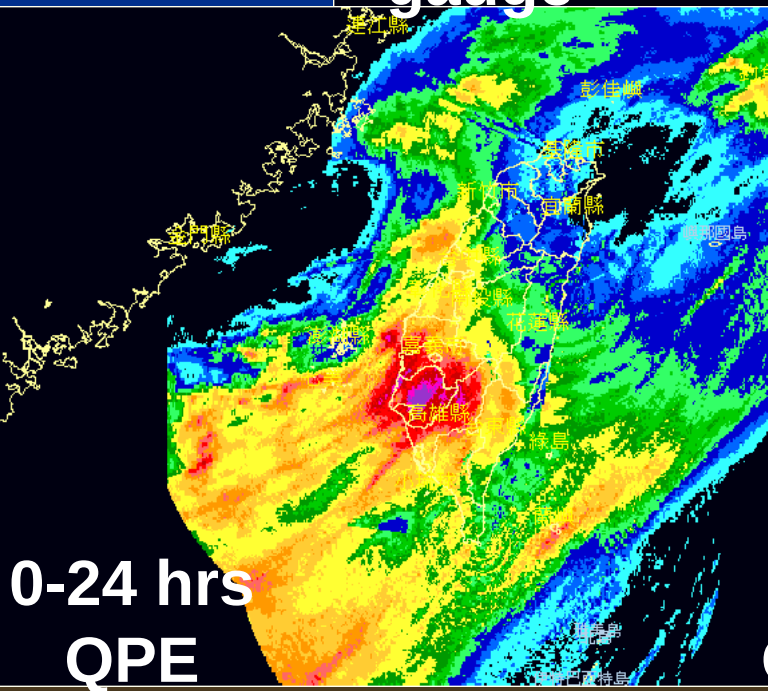
這裡地面上的降雨是多少？



雨量筒，雷達，雨量筒+雷達之降雨估計比較



Dr. P.-L. Chang
(CWB)



要準確的估計降雨，必須知道某個直徑大小的雨滴有多少個，稱之為**雨滴粒徑分佈**(Drop Size Distribution; **DSD**)，但是雷達回波無法呈現這個資訊，因此在估計降雨時會出現誤差。



2DVD



Parsivel



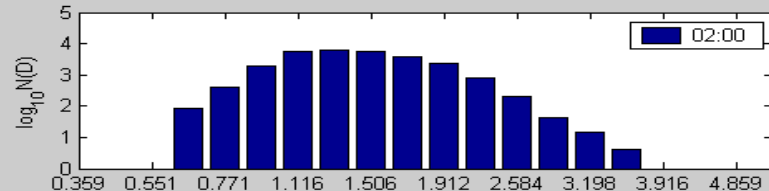
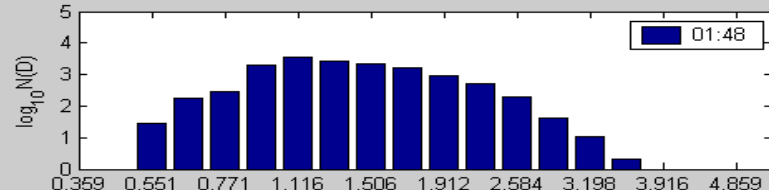
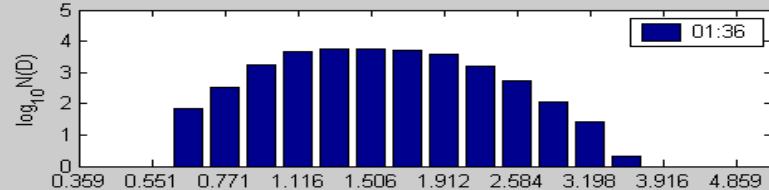
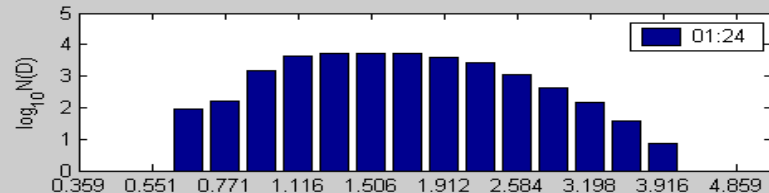
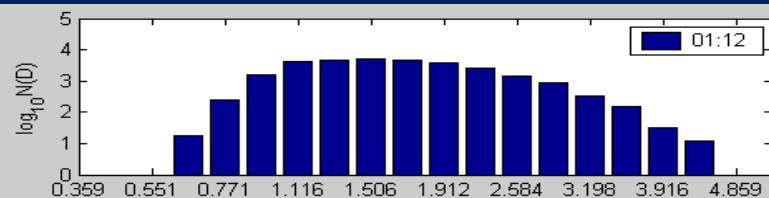
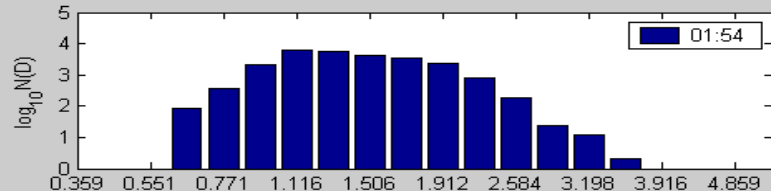
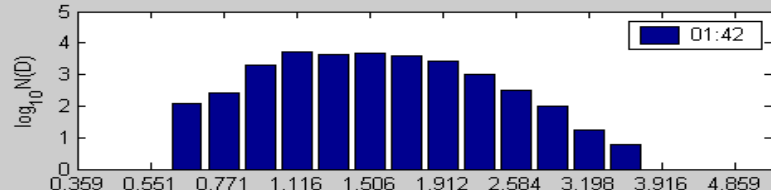
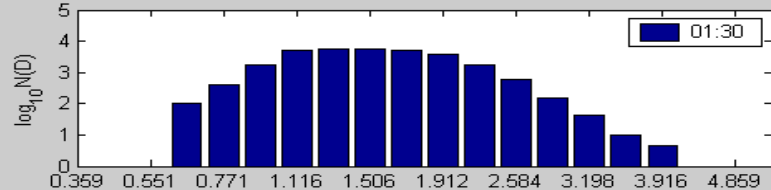
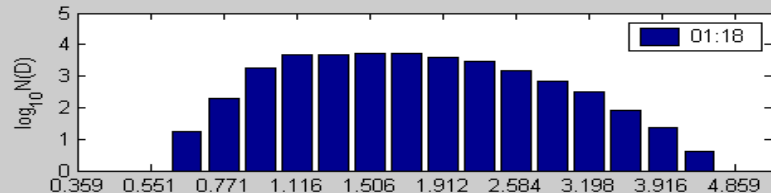
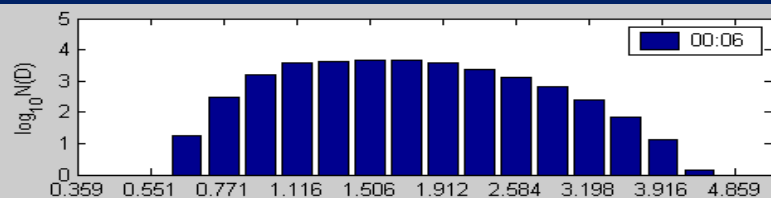
各型雨滴譜儀



JWD

雨滴粒徑分佈(Drop Size Distribution ; DSD)

(雨滴譜儀可量測**某個地方單點**的雨滴粒徑分佈，根據此單點的資訊可以**對雷達估計的降雨進行校正**)



如何估計降雨量？

定量降雨估計(QPE)

(Quantitative Precipitation Estimation)

估計發生在某地**現在的降雨量**(mm/hr)

(a)使用雨量筒

(b)使用雷達回波

(c)使用雷達回波+雨量筒網

(d)**使用雷達回波+雨滴譜儀**

(e)使用雙偏極化雷達



A 與 b 係數可以用數學方法推導得出，
而不是用統計迴歸方式求得，可以提升估計降雨的精確度。

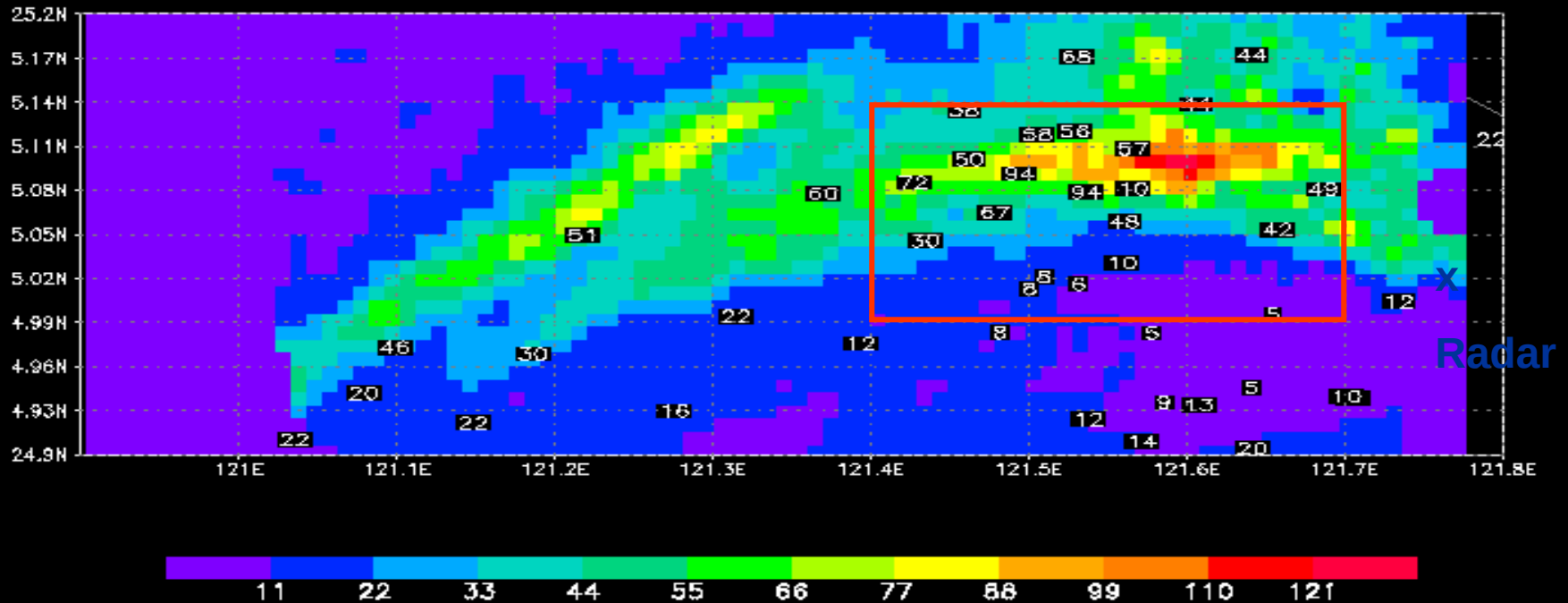
$$A = \frac{10^6 \Gamma(6 + m + 1) N_0^{1-b}}{[33.31 \Gamma(3.67 + m + 1)]^b}$$

$$Z = AR^b$$

$$b = \frac{6 + m + 1}{3.67 + m + 1}$$

Z (+3 dBZ) with modified Z-R

CZR & R — 3.0 dBZ



Station	Modified Z-R (+ 3 dBZ)	$Z = 300R^{1.4}$
44.58 mm/hr	45.51 mm/hr	21.99 mm/hr

如何估計降雨量？

定量降雨估計(QPE)

(Quantitative Precipitation Estimation)

估計發生在某地**現在的降雨量**(mm/hr)

(a)使用雨量筒

(b)使用雷達回波

(c)使用雷達回波+雨量筒網

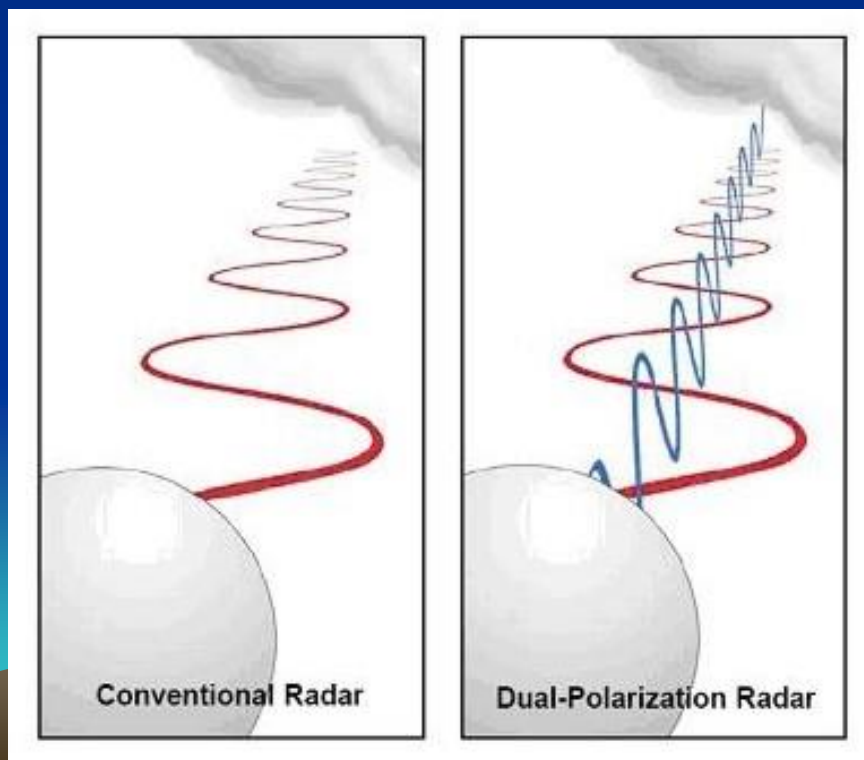
(d)使用雷達回波+雨滴譜儀

(e)使用雙偏極化雷達



雙偏極化雷達 (dual-Polarimetric radar)

- 偏極化：
 - 電磁波傳遞時電場振盪的方向。
- 雙偏極化雷達：
 - 發射水平、垂直偏極化方向的電磁波來做觀測。

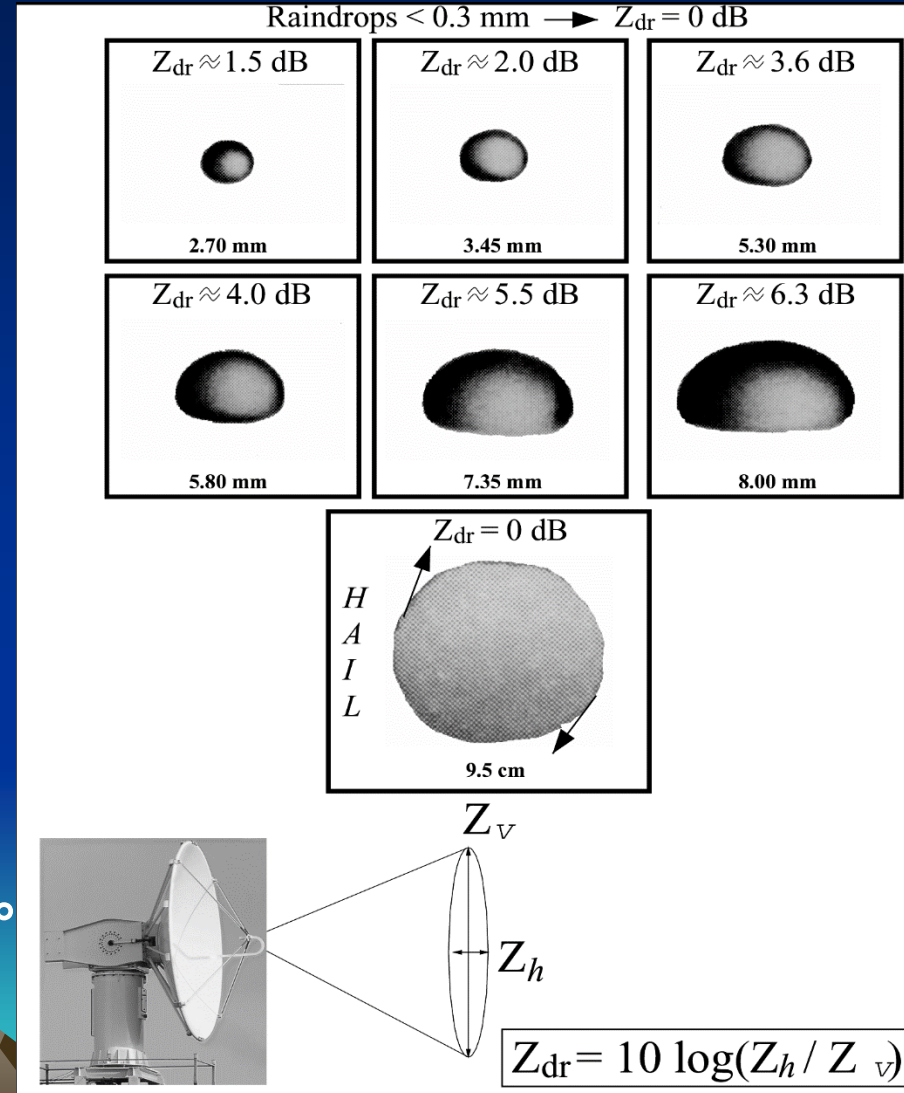


Z_{HH} Z_{VV}	Radar reflectivity	回波	dBZ
Z_{DR}	Differential reflectivity	差異反射率	dB
LDR	Linear depolarization ratio	線性退偏極比	dB
Φ_{DP}	Differential phase shift	差異相位差	°
K_{DP}	Specific differential propagation phase shift	比差異相位差	°/km
ρ_{HV}	Cross-correlation Coefficient	相關係數	%

Z_{DR} 差異反射率

$$Z_{DR} = 10 \log \frac{Z_{HH}}{Z_{VV}}$$

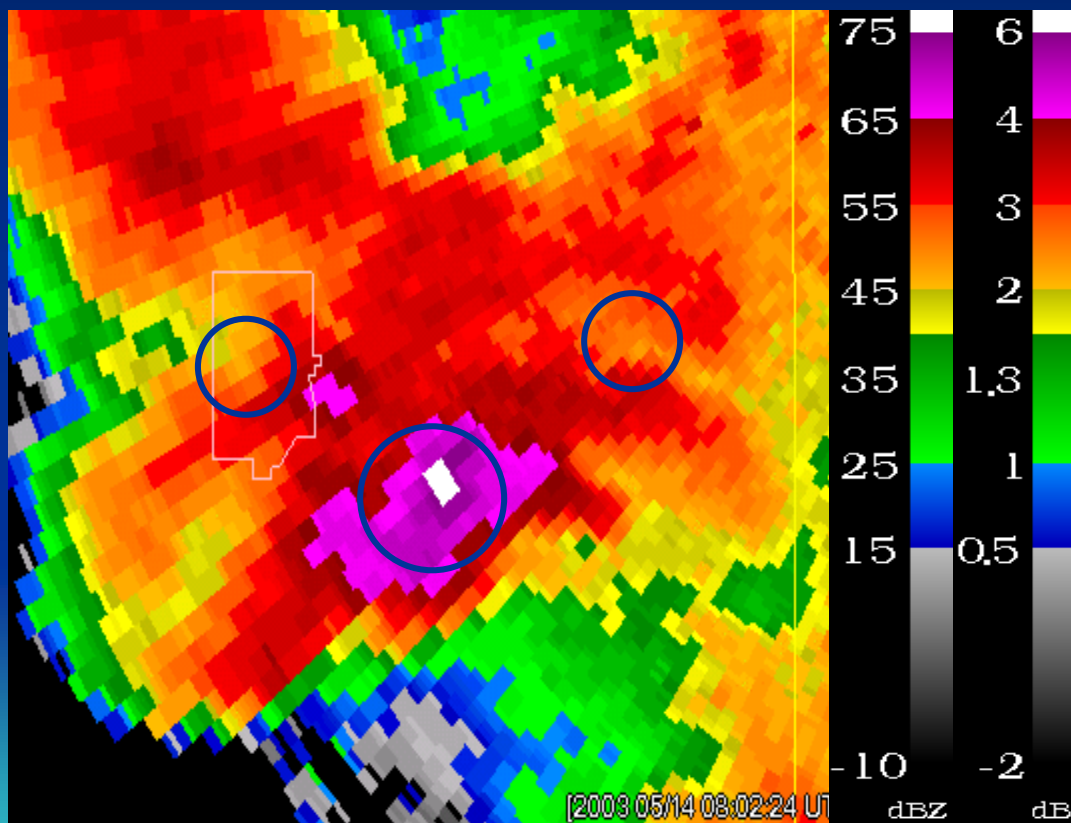
- 雨滴越小→越圓→小 Z_{DR}
- 雨滴越大→越扁平→大 Z_{DR}
- 冰雹→大 Z_{HH} →小 Z_{DR}
- 有助於分辨出降水粒子形狀與大小，計算雨滴粒徑分佈(DSD)，降水型態分類。



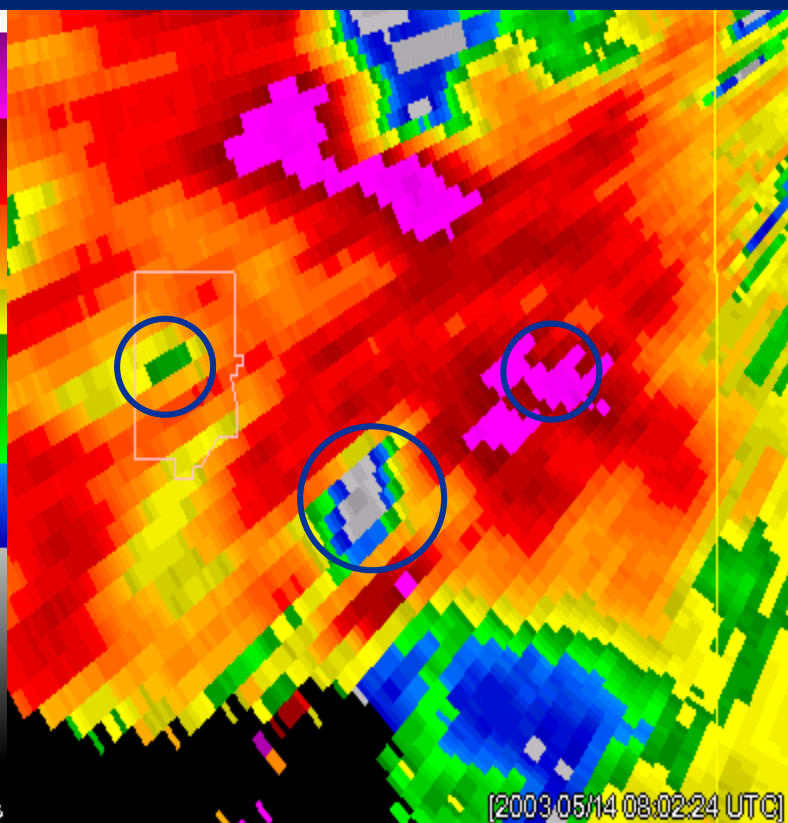
Z_{HH} 很相近， Z_{DR} 不一樣：雨滴粒徑大小不同。

Z_{HH} 很大， Z_{DR} 小：冰雹!!!

Z_{HH}



Z_{DR}



冰雹
(Hail)



切開後
的冰雹



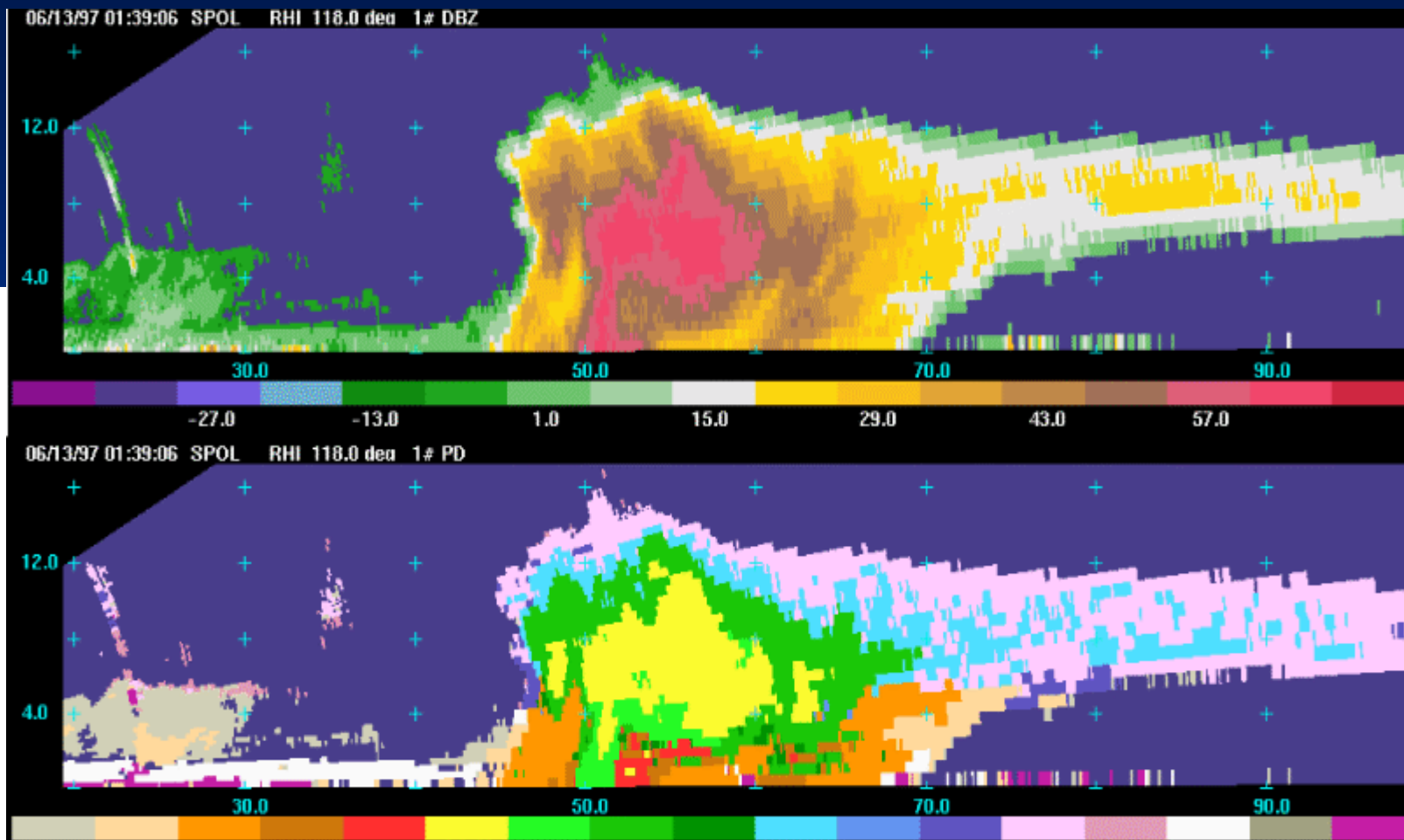
軟雹 (graupel)



Table 7.3: Ranges of polarimetric variables and temperature for various hydrometeor species, from Keenan (2003)

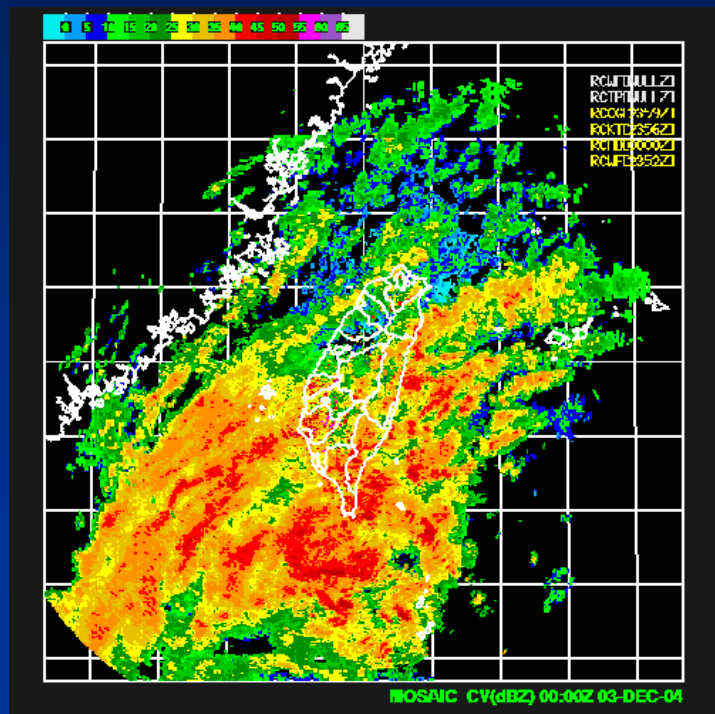
	Z_{HH} (dBZ)	Z_{DR} (dB)	ρ_{co}	K_{DP} (deg /km)	Temp (°C)
Drizzle	10-25	0.2 to 0.7	>0.97	0 to 0.06	>-10
Rain	25 to 60	0.5 to 4	>0.95	0 to 20	>-10
Snow (Dry, low density)	-10 to 35	-0.5 to 0.5	>0.95	-1 to 1	< 0
Snow ⁴ (Dry, High density)	-10 to 35	0.0 to 1	>0.95	0 to 0.4	<0
Snow (Wet, melting)	20 to 45	0.5 to 3	0.5 to 0.9	0 to 1	0 to 5
Graupel, dry	20 to 35	-0.5 to 1	>0.95	0 to 1	<0
Graupel, Wet	30 to 50	-0.5 to 2	>0.95	0 to 3	-15 to 5
Hail, small < 2cm wet	50 to 60	-0.5 to 0.5	0.92 to 0.95	-1 to 1	-15 to 20
Hail, large > 2 cm wet	55 to 65	-1 to 0.5	0.90 to 0.92	-1 to 2	-25 to 20
Rain & Hail	45 to 80	-1 to 6	>0.9	0 to 20	-10 to 25

範例一對流降水



(Vivekanandan et al. 1999)

降雨率的估計



分析個案：冬颶 - 南瑪都

時間：2004/12/04 01:19開始

分析12小時

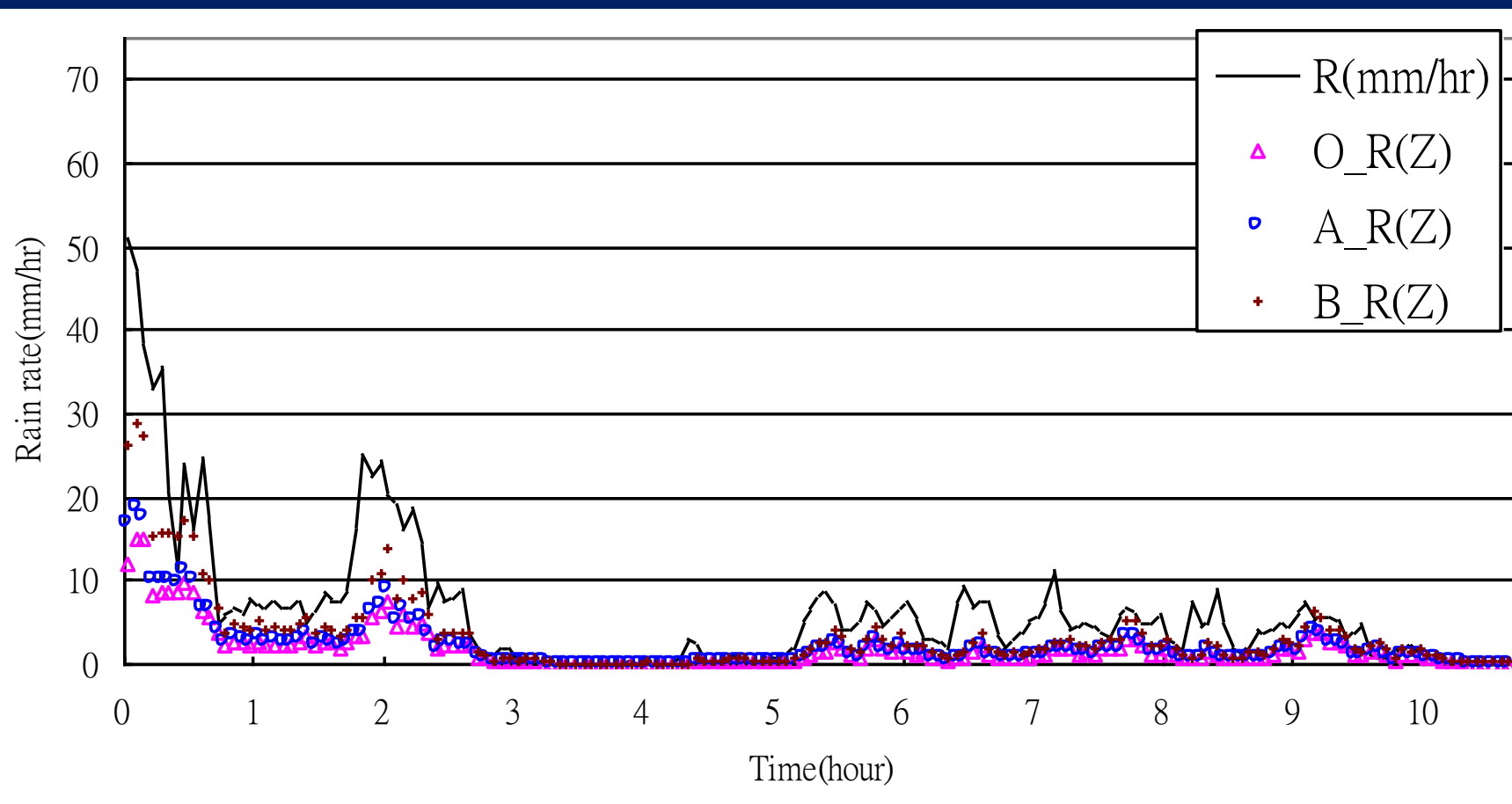


中大(偏極化雷達)

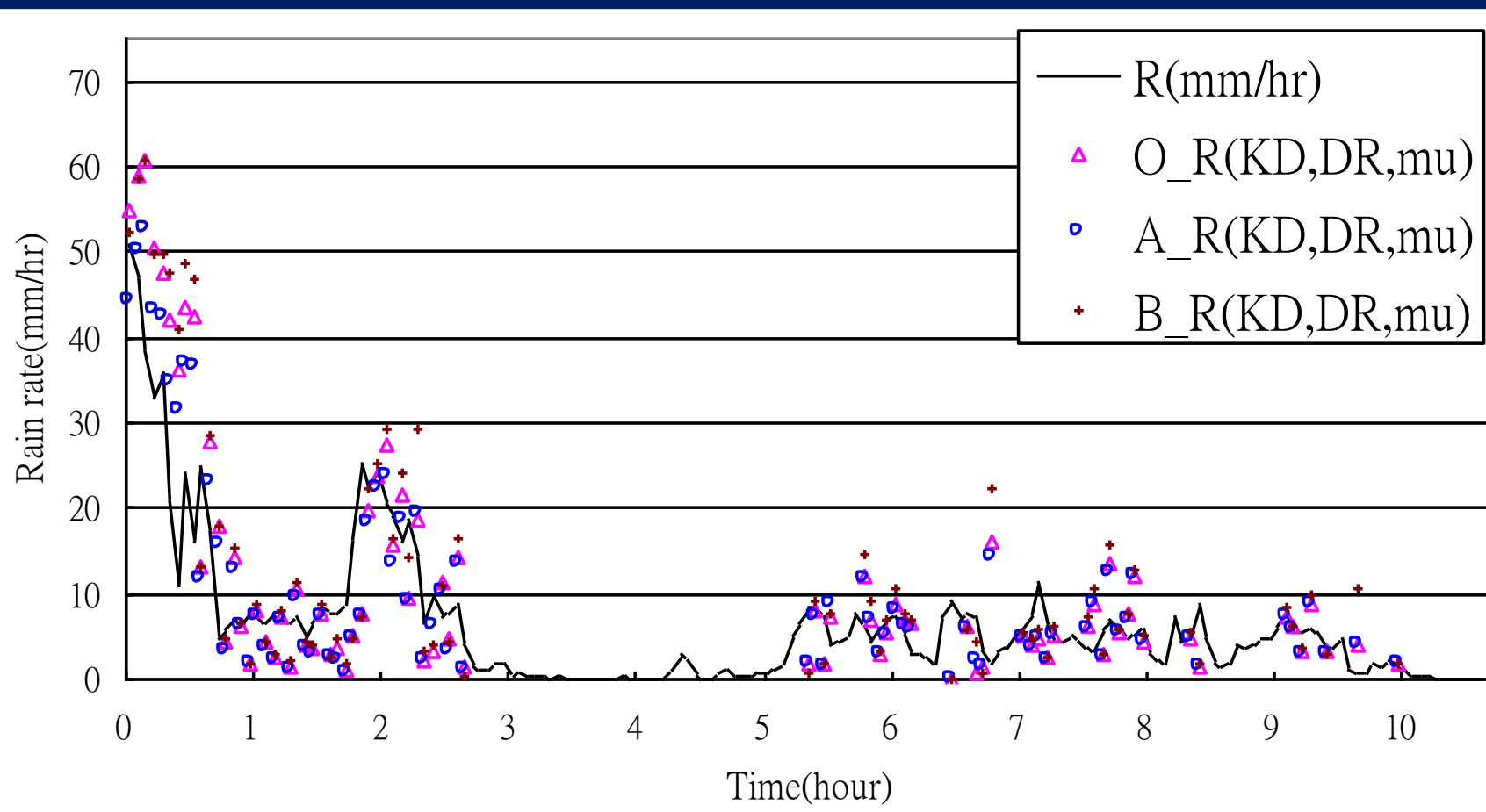
44KM

南港(雨滴譜儀)

使用原來WSR-88D $Z=300$ $R^{1.4}$ 公式計算降雨率



中大雙偏極化雷達估計降雨率



雙偏極化雷達優點：

- (1)可求出空間中的雨滴粒徑分佈(DSD)，改進估計降雨量的準確度。
- (2)可做水象粒子分類（小雨、大雨、過冷水、雪、冰雹、軟雹、冰晶、昆蟲…）。
- (3)雷達資料品質控管。



雷達資料與定量降雨預報(QPF)

(Quantitative Precipitation Forecast)

預測發生在某地未來某個時間的降雨量

(資料同化：用雷達資料及其它觀測資料修正數值模式對未來天氣的預報)



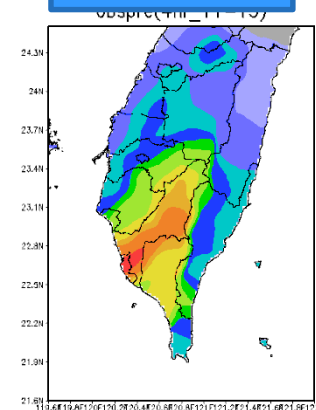
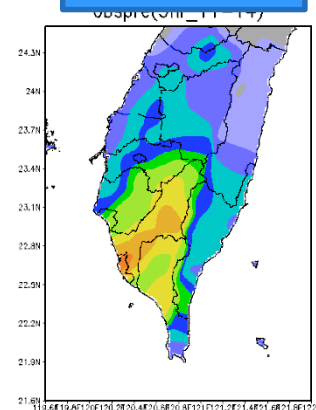
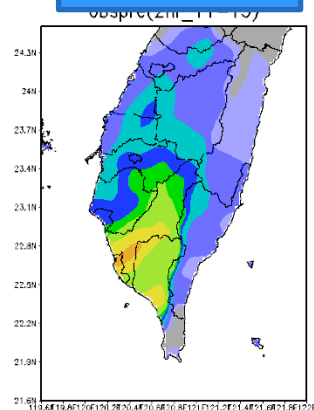
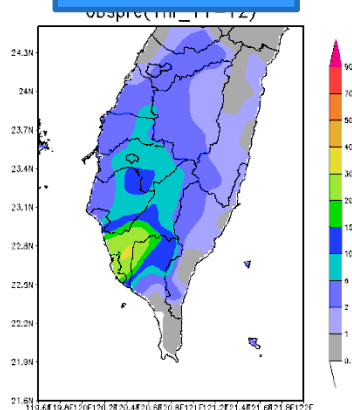
1 hr

2 hr

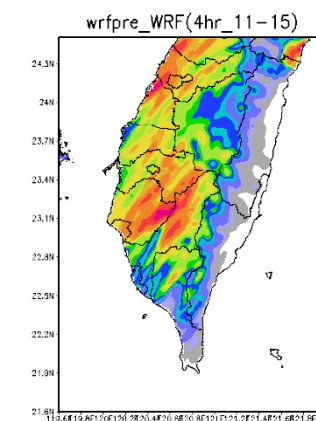
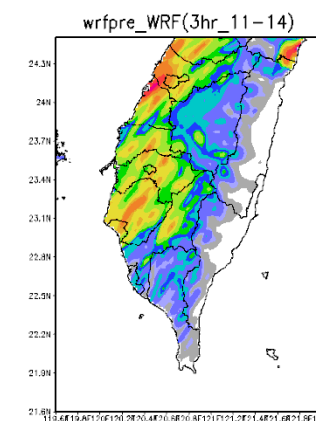
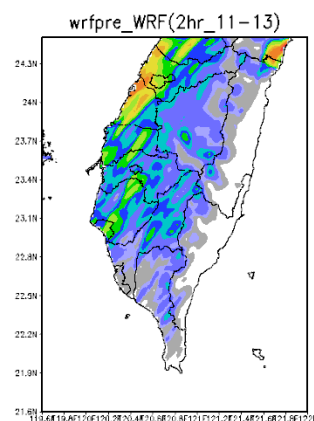
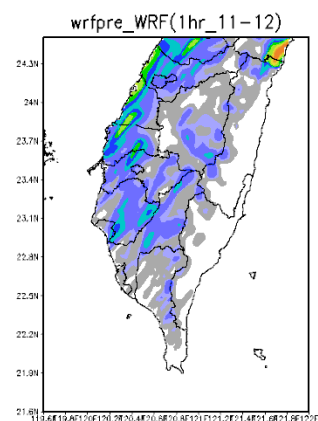
3 hr

4 hr

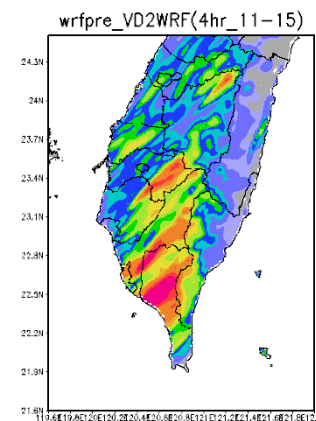
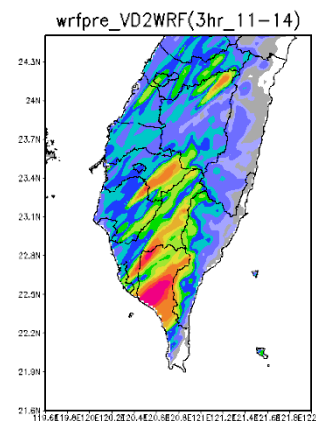
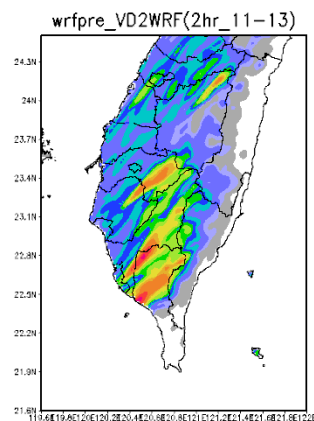
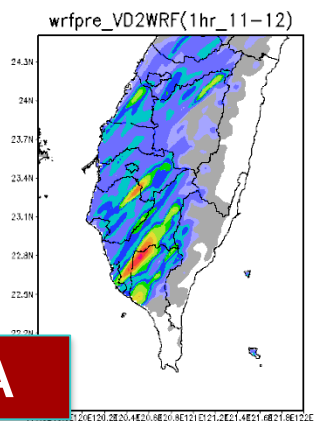
OBS



WRF



WRF+DA



陸基式固定雷達之主要限制：

- 1) 無法主動接近天氣系統進行觀測。
- 2) 作業用雷達的掃描策略已固定，如需因研究目的而要做彈性變更比較困難。
- 3) 可進行雙雷達合成的區域有限。
- 4) 嚴重的地形阻擋以致無法觀測低層大氣。



1. 2006年9月28日：國科會正式核定「移動式雙偏極化雷達建置計畫」。由中大負責建置台灣第一部移動式氣象雷達，但為氣象界共享之儀器。
2. 2008年3月31日建置完成。

**Taiwan Experimental Atmospheric Mobile-Radar
TEAM-Radar**



TEAM-R 基本規格

- 1) **X-band** , 9.62 GHz 。
- 2) 同時 水平/垂直 極化 。
- 3) 調速管 (Klystron)發射機 , 50Kw peak power 。
- 4) 天線直徑 1.8公尺 , 1.2 度波束寬 。
- 5) 觀測變數: V_r 、 Z_{HH} 、 Z_{DR} 、 Ψ_{DP} 、 K_{DP} 、 ρ_{HV} 。
- 6) 觀測範圍: 50-100 km 。
- 7) **在台灣進行雷達軟硬體的組合與測試 。**



TEAM-R主要元件

Item	Company	Delivery day
發射機	Applied System Engineering (美國)	2007/09/06
接收機與訊號處理	SIGMET (美國/芬蘭)	2007/09/04
天線	Aerial (芬蘭)	2007/11/15
天線基座	Orbit (以色列)	2007/11/15



台灣首部移動式雙偏極化都卜勒氣象雷達 TEAM-R

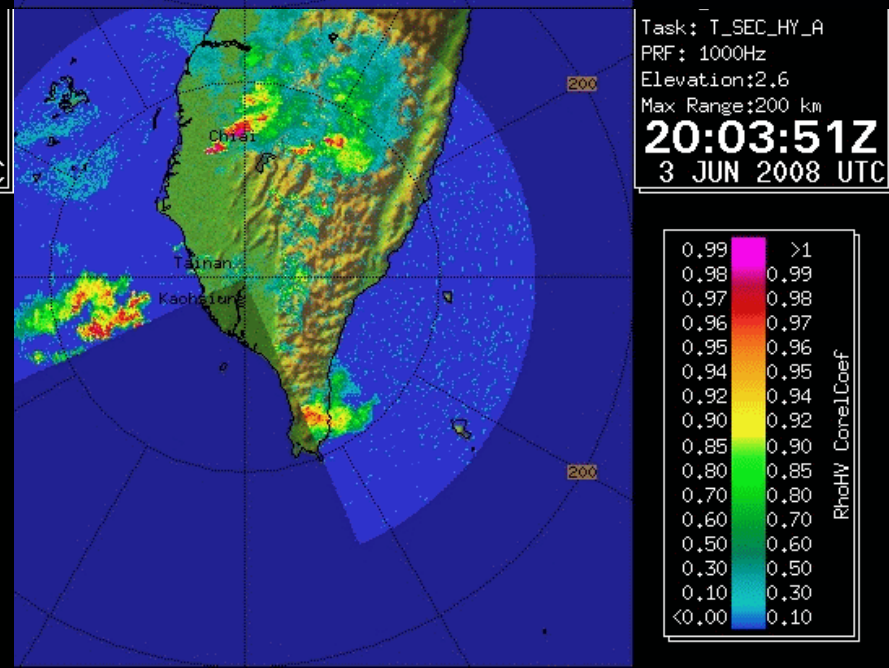
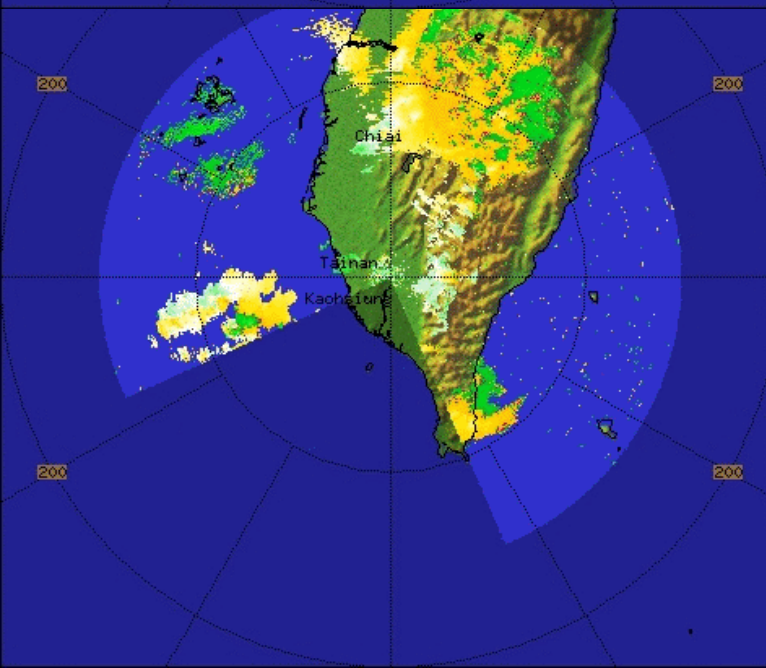
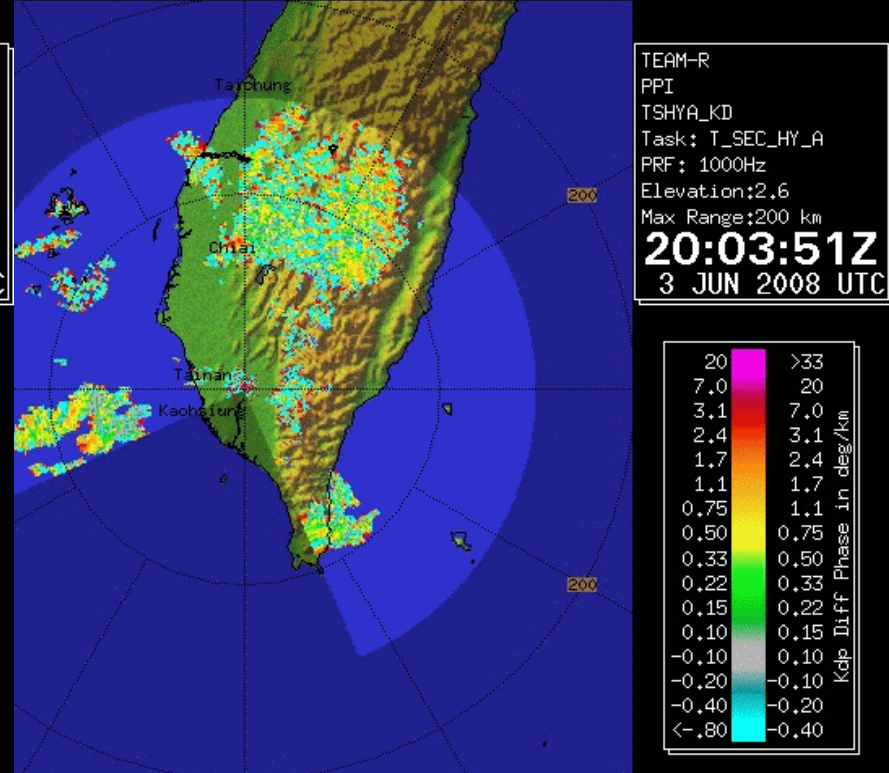
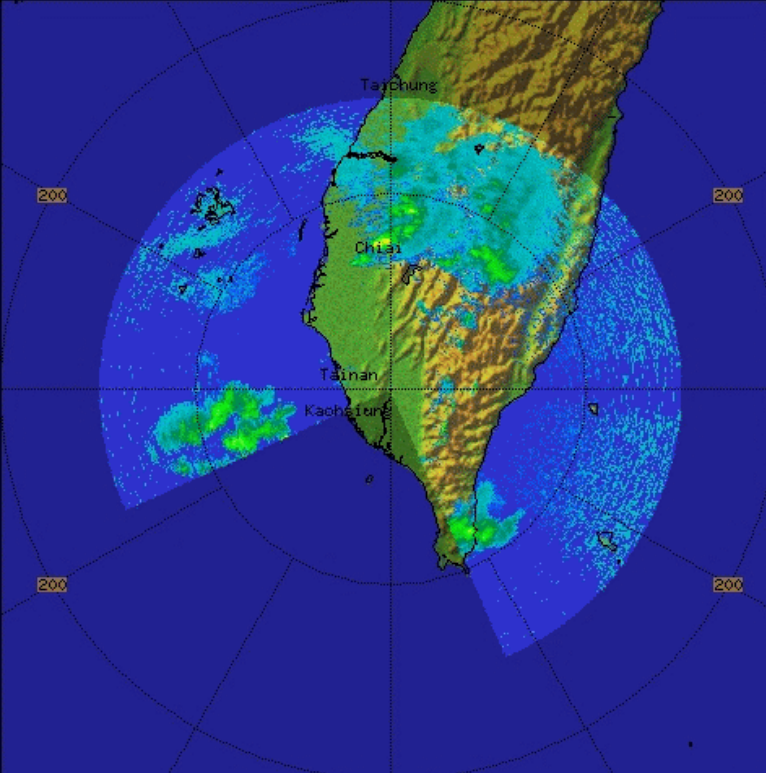




2008年
西南氣流豪雨與預報實驗

Kao-Ping River Levee

© 2007 ZENRIN
Image © 2007 TerraMetrics
© 2007 Europa Technologies





97/6/29在高雄縣茂林大津堤防。



97/7/18卡玫基颱風在桃園縣觀音鄉。



97/7/28日鳳凰颱風在石門水庫。



97/9/12-14辛樂克颱風及9/28-29薔蜜颱風在中大正門口。





2018韓國平昌冬季奧運會

(ICE-POP2018)

International Cooperative Experiments
for the PyeongChang 2018 Olympics &
Paralympic Winter Games

參加觀測的團隊:

台灣，韓國，美國，加拿大，奧地利，西班牙，俄羅斯
，中國大陸，澳洲，瑞士，英國

A stylized silhouette of a mountain range in shades of brown and tan, positioned at the bottom of the slide.

ICE-POP for 2018 Winter Olympic **TEAM-R radar** at PyeongChang, Korea(2017/01-2017/04)



未來發展

發展新型雷達(如:相位陣列雷達、雲雷達、機載雷達)



小型化、輕便化的雷達網發展，觀測對象為一大都會區或水庫上游集水區。

結論

1. 氣象雷達提供**高時空解析度的風和雨**資訊，是監測劇烈天氣的重要儀器。
2. **對流的初生，定量降水估計及預報**為雷達氣象研究發展的重點，在台灣是極為挑戰的題目。
3. 持續**野外觀測實驗**，目標為發展出合適的預報流程(強降雨機制為何？模式如何預報？使用何種儀器？如何觀測？)。





台灣區域豪雨觀測與預報實驗

Taiwan-Area Heavy rain Observation and Prediction Experiment (TAHOPE)

PI: Ming-Jen Yang 楊明仁¹

Co-PIs: Yu-Chieng Liou 廖宇慶², Ten-Chiang Yeh 葉天降⁵,

Ching-Yuang Huang 黃清勇^{2,6}, Pay-Liam Lin 楊舒芝²,

Po-Hsiung Lin 林博雄¹, Chung-Chieh Wang 王重傑³,

Ching-Hwang Liu 劉清煌⁴, Jou-Ping Hou 侯昭平⁷

¹國立臺灣大學, ²國立中央大學, ³國立臺灣師範大學, ⁴私立中國文化大學

⁵中央氣象局, ⁶國家實驗研究院, ⁷國防大學理工學院





**美國國家大氣研究中心 S-PolKa 氣象雷達來台灣參加
2020年 TAHOPE 觀測實驗
(Taiwan-Area Heavy rain Observation and Prediction Experiment)
2020/5/25-2020/8/10**

新竹港南運河風景區





Thank you for listening