

臺灣氣候與雷達電波之選擇

湯捷喜

*On the choice of radar wave length
under climatical conditions of Taiwan*

Chieh-hsi Tang

Abstract

1. The efficiency of radar detection is generally affected by the amount of Precipitation and is closely related to the wave lengths of the radar employed.

2. According to the equation, $R_{\max} = \sqrt{\frac{F\pi^6}{192} \left| \frac{e-1}{e+2} \right|^2 \frac{P_t A_p h Z}{P_r \text{Min}\lambda^4}} \cdot 10^{-0.1K \int_{\text{radr}}}$

the maximum detectable range of radar is indicated in the Figure (4). This shows that wave length of 3.2cm. is suitable for detection of rain ranging from 0.3mm/hr.; 5.7cm. for rainfall varying from 3.1-15.0mm/hr.; and 10cm. for heavy rain ranging from 15.1-100.0mm/hr.

3. Main reasons for the installation of radar stations in Taiwan are: (1) for the detection of typhoons during the summer and (2) to study the passage of frontal systems during the winter in particular.

4. The result of this paper will indicate the relationship between the predominant climate and the intensity of rainfall in Taiwan. The choice of weather radar wave lengths has been found that wave length 10cm is most suitable for the detection of typhoons because the range of hourly meanrainfall is generally within a limit of 15.1-100.0mm/hr. On the other hand, Wave length of 5.7cm is suitable for the observation of movement of the fronts, which frequently gives a mean rainfall with in the limit of 3.1-15.0mm/hr.

一、序 言

近年來電子工程學進步甚速，其應用亦隨之大為推廣，一般科學莫不利用電子儀器，以求測定之正確迅速及方便，即以自然科學中之氣象工作而言，以往高空資料不易探測，目前已可使用高空探測儀 (Radio-sonde or Rawin-sonde) 及超高層氣象探測儀 (High Altitude Rocket) 測得正確之高空氣象資料。遙遠廣浩而無測站之洋面，其氣象情況本亦為氣象工作者至感棘手之問題，目前已可由氣象雷達偵知其天氣變化。高山、離島、沙漠、極地，不適人居之處，亦可由無線電自動測候儀 (Automatic Weather Station) 代替人類工作。目前正在研究中者尚有電子計算機，以為長期預報之輔助工具。凡此種種皆為使氣象工作進步發展之有力因素。

上述各項電子儀器中，尤以氣象雷達為本省氣象工作之必要儀器，蓋以本省四週環海，氣象資料稀少，預告工作頗感困難，必需以雷達偵測而為預告之助。茲願在本省計劃增設氣象雷達站前，先就本省地理環境、氣候特點，與雷達電波之關係加以探討，以為設置雷達站之參考。

二、雷達之發展

茲為下文敘述方便起見，先略述雷達之發明經過：本來雷達是為軍事上之需要，在第二次世界大戰時發明，作為偵察敵方機艦行動之用，嗣後復經用為海空航運助航設備，惟在此一段實用期間發見其偵察效率常受氣象因素而生誤差，因而發現雷達在偵測氣象方面有頗大之效果，此後在1941年由英國之李德 (J. W. Ryde) 氏開始

從事研究配合於氣象方面使用，迄今已有十餘年，其間雖經各國設計改良而至應用階段，但在效果上仍有若干困難問題存在，仍待改善解決，其中最大者即為如何選擇所使用之波長以適應各地之氣候特性，蓋因雷達僅能使用一種波長，不如一般無線電收發報機可以任意變更也。

三、雷達能測定之氣象項目

- (一) 颱風之動態，即颱風之位置，移動方向及速度之測定。
- (二) 降水之強弱及降水量之測定。
- (三) 降水區內之雨滴落下之速度，分佈情形及擾動情形等之偵測。
- (四) 垂直面內之水蒸氣及濕度分佈情形之定量測定。
- (五) 雲頂及雲底之高度測定。
- (六) 結冰高度之測定。
- (七) 高空風之測定。

四、使用雷達偵測氣象之優點

- (一) 現用天氣圖僅可明瞭某一特定時間之天氣狀況，然以雷達偵測即可以連續偵測，明瞭全面之變化情形。
- (二) 能獲悉在其偵測範圍內降雨經過實況。
- (三) 能偵知天氣圖上無法判斷之低氣壓及鋒面內之擾動情形。
- (四) 在現有氣象觀測網及天氣圖上不能發見之局部現象可以一目瞭然。
- (五) 研究雷達電波之反射曲折情形，可以判斷氣團之性質。
- (六) 能觀測近海之波浪情形作為海面預告之研究。

五、雷達電波之傳播

為便於說明後面幾個問題，首先就雷達電波傳播之基本問題略為敘述於下。

設雷達輸出電力為 $P_t(w)$ ，在使用無指向性天線 (Non-directive Antenna) 時，由雷達設置點 O 距離 r 之 O' 點，其電力密度 $P(w/cm^2)$ 可以次式表示：(見圖1)

$$P = P_t / 4\pi r^2 \quad (w/cm^2) \dots\dots\dots (1)$$

倘若使用指向性天線 (Directional Beam Antenna) 時，由雷達所發射之電波便集中成爲一束，如光線之進行，於是該天線獲益 (Gain) 爲 G_t ，此時 O' 點之電力密度則爲 P_{Gt} ，同時在 O' 點當然產生與該電力密度成相當比例強度之反射電波至 O 點，此時 O 點之電力密度則爲 $P_{Gt} \sigma / 4\pi r^2$ ，式中 $\sigma (cm^2)$ 爲比例常數，一般稱爲雷達之有效等值面積 (Effective Cross Section)，是由於目標物體之形狀而定。

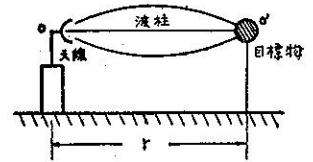


圖 1

設天線之有效面積爲 $A_o (m^2)$ 收訊電力 $P_r (w)$ 則：

$$P_r = \frac{P_{Gt} \sigma A_o}{4\pi r^2} (w) \dots\dots\dots (2)$$

以 (1) 式代入則得：

$$P_r = \frac{P_t G_t \sigma A_o}{(4\pi r^2)^2} (w) \dots\dots\dots (3)$$

如收發信號使用同一天線，以過去經驗所得，該天線之有效面積 $A_o (m^2)$ 與實際天線面積 $A_p (cm^2)$ 之間，有 $A_o = 2A_p / 3$ 之關係，且其天線獲益 G_t 與天線有效面積 $A_o (cm^2)$ 之間有 $G_t = 4\pi A_o / \lambda^2$ 之關係，因此

(3) 式可寫成如：

$$P_r = \frac{P_t \sigma A_p^2}{9\pi \lambda^2} (w) \dots\dots\dots (4)$$

上式係假定雷達所發出之電波在傳播中途，未經受到任何阻礙，即其能力不受減弱，一直達到目標物時成立

之雷達基本方程式，該式指出：收訊電力 $P_r(w)$ 是與輸出電力 $P_t(w)$ 、雷達有效等值面積 σ (cm^2) 及天線之面積 A_p (m^2) 之二次方成正比例，而與距離 r (cm) 之四次方及波長 λ (Cm^2) 之二次方成反比例。將 $P_t A_p^2/9\pi\lambda^2$ 換為 K_1 代入 (4) 式則： $P_r = k\lambda/r^4 \dots \dots \dots (5)$

六、雷達電波之傳播與雨滴之關係

雷達基本方程式 (4) 式應用於氣象雷達時，與其他單用及助航雷達有所不同者，即是雷達之有效等值面積 σ (cm^2)，在以所使用波長與雨滴直徑比例頗大之原則下，則得次式表示：

$$\sigma = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} \left| \frac{e-1}{e+2} \right|^2 (\text{cm}^2) \dots \dots \dots (6)$$

式中 e 為雨滴之複素誘電率 (Dielectric Constant of Water)，是由波長及溫度而定之。惟事實上降水現象是由於多數雨滴集合而成，所以計算降雨區內之有效等值面積，必須每粒大小不同之雨滴分別計算後彙計之，但事實上為不可能，因此由於統計研究結果，某一單位體積中之雷達有效等值面積 σ_0 得以次式求之，

$$\text{則： } \sigma_0 = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{e-1}{e+2} \right|^2 \sum N_D D^6 (\text{cm}^2/\text{cm}^3) \dots \dots \dots (7)$$

式中 D cm 為雨滴之直徑， N_D 為直徑 D cm 雨滴在單位體積中之數量，假定單位體積中之雨滴之直徑平均為 D_0 (cm)，其數量為 N_0 時，則得次式

$$\sigma_1 = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{e-1}{e+2} \right|^2 N_0 D_0^6 (\text{cm}^2/\text{cm}^3) \dots \dots \dots (8)$$

根據樓氏 (J. O. Laws) 及白遜 (D. A. Parsons) 氏兩人研究調查之雨滴分佈情形，經李德氏 (J. W. Ryde) 計算其各種降雨強度 I (mm/h)，對雷達有效等值面積 σ_0 (m^2/cm^3) 值如表 1。

降雨強度 I mm/h	波長 $\lambda 1.25 \text{cm}$	波長 $\lambda 3.0 \text{cm}$
	$\sigma_0 (\text{cm}^2/\text{cm}^3)$	$\sigma_0 (\text{cm}^2/\text{cm}^3)$
0.25	0.534×10^{-8}	0.0115×10^{-9}
1.25	6.58×10^{-8}	0.116×10^{-8}
2.5	18.2×10^{-8}	0.337×10^{-8}
12.5	162×10^{-8}	4.57×10^{-8}
25	390×10^{-8}	14.5×10^{-8}
50	901×10^{-8}	46.2×10^{-8}
100	$2,000 \times 10^{-8}$	148×10^{-8}
150	$3,130 \times 10^{-8}$	289×10^{-8}

表 一

設雷達發出之波柱垂直寬度 (Vertical Beam Width) 為 θ (rad)，及水平寬度 (Horizontal Beam Width) 為 h (cm) ($h=3 \times 310^{10} \tau$ ， τ 為秒單位之水平寬度) 時，距離雷達站 r (cm) 點之反射體積 V (cm^3) 則： $V = \pi (r\theta/2)^2 (h/2)$ (cm^3) (見圖 2)，假定波柱垂直寬度非常小，且雨滴之大小相等時則： $\sigma = \sigma_0 V$ ，在此種情形下，將 (7) 式代入 (4) 式則得：

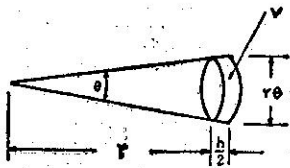


圖 2

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{P_t \sigma_0 \pi (r\theta/2)^2 (h/2) A_p^2}{9\pi r^4 \lambda^2} (w) \\ &= \frac{P_t \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{e-1}{e+2} \right|^2 \sum N_D D^6 \pi \frac{r^2 \theta^2}{4} \cdot \frac{h}{2}}{9\pi r^4 \lambda^2} (w) \\ &= \frac{\pi^5}{72} \left| \frac{e-1}{e+2} \right|^2 \frac{P_t A_p^2 h \theta^2 \sum N_D D^6}{r^2 \lambda^6} (w) \dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

在傘形天線 (Parabola Antenna) 所發出之波束，其波束寬度 (Beam Width) θ (rad)、波長 λ (cm) 及天線直徑 d (cm) 之間，經實驗所得有次式關係存在，即： $\theta = 1.2\lambda/d$ (rad)、如天線之面積為 A_p (cm^2) 則： $A_p = \pi d^2/4$ (cm)，此等關係代入於 (9) 式則得。

$$P_r = \frac{\pi^6}{192} \left| \frac{e-1}{e+2} \right|^2 \frac{P_t A_p h Z}{r^2 \lambda^4} (w) \dots \dots \dots (10)$$

此即為氣象雷達之基本方程式，但此式僅限於在雨域廣泛之地區，雷達所發出之波柱全部射中目標物 (雨域) 之原則下方能成立，若有一部份波柱射出雨域之外時，其受訊電力當即減弱，因此 (10) 式就不能成立。

再者，若在雷達發出之電波進行途中，如有降雨現象，此時電波勢力當受其阻碍而減弱，所以 (10) 式必須加以修正，設減弱常數為 K (db/km)，途中之降雨強度為 I (mm/h)，受訊電力 $P_r(w)$ 則：

$$P_r = \frac{F \pi^6}{192} \left| \frac{e-1}{e+2} \right|^2 \frac{P_t A_p^2 h Z}{r^2 \lambda^4} \times 10^{-0.1k} \int r dr \quad (w) \dots \dots \dots (11)$$

式中F為理論值與實測值之相差係數， $|e-1/e+2|^2$ 為雨滴誘電係數，其最大可能偵測距離 (Maximum Detectable Range) 為 r_{max} (cm) 則：

$$r_{max} = \sqrt{\frac{F \pi^6}{192} \left| \frac{e-1}{e+2} \right|^2 \frac{P_t A_p^2 h Z}{P_r \min \lambda^4} \times 10^{-0.1k} \int r dr} \quad (w) \dots \dots \dots (12)$$

假定雨之分佈平均，且使電波減弱之因素僅為雨滴時，(12)式以 $|e-1/e+2|^2=0.93$ ， $Z=2.00 \times 10^{-10} \text{ mm}^6$ ， $F=1/5$ ，K如表2， $A_p=3.142 \times 10^4 \text{ cm}^2$ (直徑2m傘形天線)， $7.069 \times 10^4 \text{ cm}^2$ (直徑3m之傘形天線)， $P_t=$

波長 λ (cm)	0.9	1.25	3.2	5.7	10
K db/km/mm/h	0.4	0.15	0.02	0.003	0.0004

表 2

100kw, 200w, 代入計算，得其最大偵測距離如表3。

表3之計算數值如圖3及圖4所示。

圖3及圖4指出雷達電波之傳播有三種不同結果：

(一) 達雷達電波傳播過程中，至目標物間無降水時，其可能偵測最大距離是由於使用波長而變，如使用較短波長偵測時，其偵測距離較使用較長波長時為大，換言之，雷達電波進行中間無降水現象阻礙時，較短波長雷達之偵測性能較高。(參見圖3)

(二) 雷達電波傳播過程中至目標物間如有降雨，電波之進行當受雨滴阻礙，減弱其勢力，而縮短偵測距離，其減弱之程度是與波長成反比例，則波長短，減弱率大。圖4指出波長0.9公分因減弱率大，致不能使用，波長3至10公分尚佳，茲以3.2公分，5.7公分，10公分三種波長之偵測能力與每小時降水量間之相關關係列舉於後(假定雷達站至目標物間之降水強度平均分佈時)

1. 小雨 (0~3mm/h)：雷達電波進行過程中，如全面為0~3mm/h 強度之降雨時，波長3.2公分之偵測距離最大，波長10公分之偵測距離最小，即波長短偵測距離大，反之則小。

2. 中雨 (3.1~15.0mm/h)：在中等程度降雨現象之下使用波長5.7公分最適合，波長3.2公分則較差，但使用波長10公分將其天線直徑增大亦可應用(參見圖4B)

3. 大雨 (>15.1mm/h)：每小時降水量達到15.1公分以上時，使用10公分波長最適合，5.7公分波長由於雨量增加，偵測距離隨此縮短，3.2公分波長不能使用(見圖4)

(二) 雷達設置點與目標物中間之降水強度不同時，雷達偵測距離之變化，有兩種不同現象，一為目

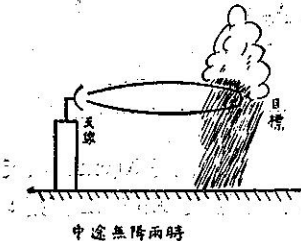
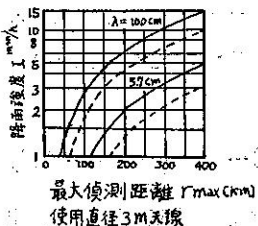
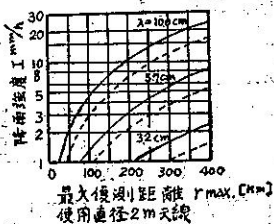
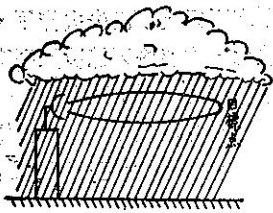


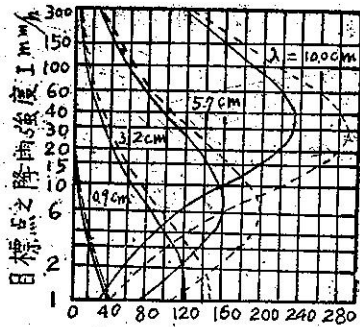
圖3：實線 $P_t=100\text{kw}$ 點線 $P_t=200\text{kw}$



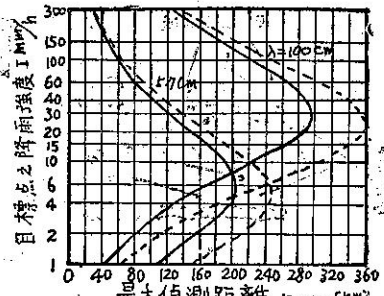
標物之降水比中途之降水較大時，一為中途之降水比目標物之降水較大時，此兩者偵測距離之比較，當然前者較後者為大(見圖5)



降雨強度平均時

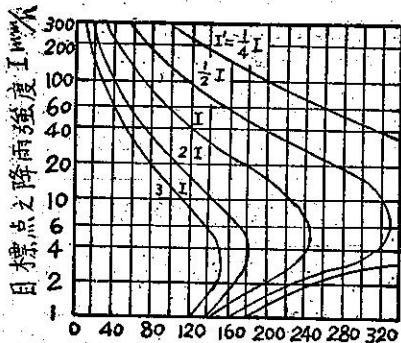


最大偵測距離 r_{max} [km]
(使用直徑 2 m 天線時特性)

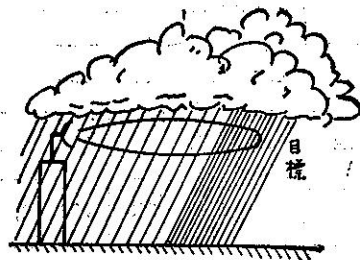


(使用直徑 3 m 天線時特性)

圖 4: 實線 P_t = 100kw 點線 P_t = 200kw



中途降雨強度不同時之最大
偵測距離 r_{max} [km]



中途之降雨強度不同時

圖 5

七、結 論

氣象因素影響雷達偵測之效能，既然有如此密切關係，因此設計裝置雷達站時，必先對裝設雷達之目的，所欲偵測之對象及雷達裝設地區之氣象特性，如降水量強弱變化情形等先加以決定並研究後，再去選定雷達應使用之波長，否則人力、物力、財力，均將浪費，而無理想之效果也。

本省為西太平洋之一小島嶼，四週臨海，夏季為颱風之路徑，往往慘受襲擊成災，冬季為受冷鋒隨帶強風侵襲，首當其衝，海上船隻常受威脅，天氣預告之重要當不容贅言。但本省因受地理環境限制，氣象觀測資料稀少，天氣預報時逢困難，蓋不如大陸，在廣大之地區能獲得多數連續性之資料，供為分析判斷，在此種情形之下，本省氣象從業人員雖能刻苦研究及力求改進，使預告能達到一般水準，但如再求進步，必賴增設新式之氣象儀器，以獲得更多可靠資料，僅靠人力已不易獲得更佳之效果，故在本省設立氣象專用雷達之必要性日益增大。茲基於上述理論，將本省設置氣象雷達必須先行決定之基本問題調查記述如下：

(一) 觀測之對象與設置地點及高度之決定：前節所述影響本省氣象發生重大變化，而釀成災害之原因，一為颱風，一為冷鋒。雷達設置之目的當然是為了偵測此等現象，以使天氣預告能有更多的正確資料，使預告之準確性更為增加，而能防患未然，減輕災害，其裝置地點自應根據偵測對象加以選定，所以為偵測颱風應設於南部，偵測冷鋒則應設於北部。各國雷達製造廠商所發行之目錄，常見註明雷達偵測距離在 300 公里以上，惟此一點必須注意：事實上雖然其電波能達到 300 公里以上遠處，但由於電波之性質為直進性及地球表面為弧形之關係，因致電波波柱下側界限離地面太高，而失去氣象觀測之意義（見圖 6B）設如雷達裝設於地面上，即海拔高度為零公尺處，電波進行路徑，以幾何學的方法計算，為在 100 公里處，電波離地面之高度為 788 公尺，200 公里處為 3,155 公尺，300 公里處為 7,100 公尺，（事實上電波在空中傳播時由於曲折作用，對地面成為向下凹形進行，因

此其水平可見距離比幾何學的计算值大) (參見圖6A及圖7), 即在 300 公里處已經使電波波柱下側界限超過低雲層以上, 對 7,100 公尺 (幾何學的计算高度) 以下之天氣現象已失去作用, 為補救此一缺點, 唯有將天線裝設高度增高, 其關係計算式如下: 設雷達天線裝設點之海平面高度為 H_r (m), 目標物之高度為 H_0 (m), 電波可見距離 L_r



圖 6 A

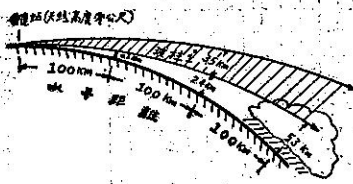


圖 6 B

(km) 為:

$$L_r^2 = 4.12 (\sqrt{H_r} + \sqrt{H_0})^2 \text{ (km)} \dots \dots \dots (13)$$

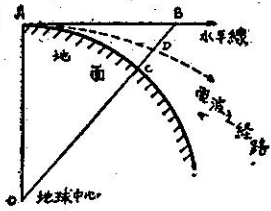


圖 7

我們研究調查氣象現象變化之高度至少仍須接近地面 500 公尺為理想, 換言之必須使雷達能看到離地面 500 公尺處之現象。茲以表 4 可以看出, 雷達能看到離地面 589 公尺高度現象之水平距離為 100 公里, 換言之, 雷達能測出離地面 589 公尺以下之現象僅限於距離雷達設置點 100 公里以內, 此一數值似不甚理想, (事實上熱帶地區由于電波曲折關係, 可以看到比較遠些)。若將天線裝設於高度 1,000 公尺處, 以 (13) 式計算, 得雷達能看到距離地面 500 公尺高度處之水平距離為 222 公里, 較前者延長

水平距離 L_r (km)	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	240	260	280	300
電波離地面高度 H_r (m)	6	24	94	212	377	589	847	1,155	1,508	1,908	2,356	3,393	3,982	4,619	5,301
幾何學計算高度 H (m)	8	31	126	284	505	788	1,136	1,546	2,020	2,556	3,155	4,544	5,33	6,189	7,100

表 4

$$L_r = 4.12 \sqrt{H_r}$$

$$L = 3.56 \sqrt{H}$$

水平距離達一倍以上, 總而言之, 雷達天線之裝設地點, 在各種條件容許之下, 應選擇高處為宜, 如北部一站裝於臺北, 乃因四週為高山阻擋, 由於地形關係, 不得不裝設於附近高山上使用, 惟恒春一站, 雖不受此限制, 但為使雷達偵測有效距離延長起見, 仍應設立於高山為佳。

(二) 臺灣氣候特性 (雨) 之調查與雷達波長之決定: 直接影響雷達偵測性能較大之氣象要素是降水現象, 茲將臺北、澎湖 (代表北部) 恒春、蘭嶼 (代表南部) 四處之每小時降雨最大量統計列舉如附表 5, 由表可以明瞭本省南北部降雨情形之趨勢, 即夏季每小時最大降水量比冬季為大, 平均都在所謂大雨以上 (15.1~100.0 mm/h), 其主要之原因當然係為颱風及熱帶性雷雨所致, 但其他冬秋春三季亦屬於中雨 (3.1~15.0mm/h) 程度, 其原因多半係為鋒面過境所致, 在此種降水特性情形之下, 可以決定說: 為對付夏季颱風偵測, 因其每小時降水量屬於大雨, 所以南部之雷達站必須採用波長 10 公分為適當, 而北部之雷達站, 其任務除夏季協同南部雷達站偵測颱風之外, 在其他時季必須兼顧偵測冷鋒之侵襲及調查研究其內部擾動情形, 其雨量多屬於中雨 (3.1~15.0 mm/h) 故採用波長 5.7 公分雷達, 似可收一舉兩得之效。(參見圖 4)

項目 地名	降水一小時最大量 (Maximum Rainfall mm/h)												
	月別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
北	平均值	5.6	7.1	9.5	14.5	23.8	33.3	38.6	32.5	26.5	13.8	5.5	5.3
	最高值	19.2	19.0	29.1	50.4	58.5	58.4	88.0	86.2	74.6	55.8	14.7	19.7
	1897-1952年平均值全年最高值為 88.0 (1946)												

澎 佳 嶼	月 別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	平均 值	9.5	10.5	18.6	16.5	24.7	27.5	20.6	15.2	12.0	14.9	12.5	9.3
	最高 值	15.2	22.3	63.0	37.8	62.0	39.4	48.8	40.1	27.1	34.0	19.2	20.9
	1943-1952年平均値全年最高値爲 63.0 (1946)												
恒 春	月 別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	平均 備	3.3	3.8	3.7	9.3	24.7	46.8	36.1	37.8	40.1	19.7	23.9	6.8
	最高 值	7.9	8.4	8.7	28.1	70.5	99.4	57.8	74.5	72.7	50.5	72.2	24.0
	1942-1952年平均値，全年最高値爲 99.4 (1943)												
蘭 嶼	月 別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	平均 值	17.6	29.2	20.6	22.2	23.7	31.3	26.2	32.4	34.8	26.7	14.6	15.8
	最高 值	37.5	74.2	40.0	42.7	38.7	43.2	89.4	51.0	50.2	76.3	18.2	40.3
	1942-1945, 1950-1952年平均値，全年最高値爲 76.3 (1951)												

表 5

美、英、日、印、加各國現用雷達波長一覽表

國 名	雷道型式	波 長	使用目的	備 註
美 國	TPQ	0.86 ^{cm}	研 究	以軍用雷達改爲氣象雷達
"	CPS-9	3.2	"	" "
"	MEW	10.7	氣象觀測	
"	Raytheon New Type	10.5	"	訂製39部，專供偵測颱風及洪水 使用，(1958年開始裝設)
英 國	Decca 40 Decca 41	3.2	"	
日 本	NMD-451	3.2	研 究	1954年5月設於氣象研究所
"	NMD-452	3.2	氣象觀測	1954年8月設於大阪管區氣象台
"	CMO-MR 54T	5.7	"	1955年8月設於九州背振山
"	CMO-MR 54M	5.7	"	1955年10月設於氣象廳
印 度	Decca 41	3.2	"	
"	AN/APQ13 SCR 717C	9.1	研 究	
加拿大	Raytheon AN/CPS-9	3.2	氣象觀測	

表 6

參 考 文 獻

1. Raytheon Manufacturing Company: Specifications for Meteorological Radar.
2. H. Fujihara & S. Shimojima: 5.66cm Weather Radar in Japan, The Geophysical Magazine, Vol. 27, No.4, 1956.
3. 小平信彦: 氣象雷達，測候時報第23卷第1號，1956，日本中央氣象台。
4. 矢島幸雄: 雷達之使用與實際，1956。
5. 伊藤庸二及高橋修一: 雷達，1953。
6. 佐貫亦男: 氣象儀器雷達之部 p.p 42-58。
7. 臺灣省氣象所: 氣象資料大全雨之部。
8. Tokyo Shibaura Electric CO.: Weather Radar and Radar Relay, Toshiba's Review Vol. 11, No. 1, 1956

附註：表 6說明氣象雷達所使用之波長較軍用雷達使用之波長爲長，蓋爲適應氣象條件，乃有採取較長波長之趨勢，尤其爲對偵測帶有強烈降雨之颱風時特別重要，因爲，假定輸出電力 200W 之氣象雷達，仍然使用原軍用雷達波長 (3.2公分)，在每小時降雨量達 20 公厘之情況下偵測，其可能達到之水平距離僅爲 50 公里，反之使用 10 公分波長時，在同一情況下可以測到 280 公里 (參見圖 4)，這一點亦可證明說：波長 3.2 公分之軍用雷達用於偵測颱風，其中心位置遠於 50 公里時可能發生誤差而影響判斷之正確。(完)