レーダーによる雨量測定の問題について

小平 信彦・青柳 二郎

気象研究所

On the Problems of Rainfall Measurements by Radar

By N. Kodaira and J. Aoyagi

Meteorological Research Institute

(Manuscript received 7 March 1961)

Abstract

The Rayleigh approximation of small particles for microwave region cannot be satisfied to all raindrops. The approximated value of radar reflectivity factor Z (when $\pi D/\lambda \ll 1$) was compared with the theoretical value (calculated from the Lowan's table and drop-size distributions). The attenuation constants for various kinds of rain are also listed from the same table.

The antenna effective area for meteorological target is somewhat less than the effective area for point target. The effective antenna receiving area for the usual meteorological radar is about 0.4 times the actual aperture.

Areal rainfall measured by radar rainfall contours is compared to raingauge observations, about 23 gauges in a section of 638 km². The accuracy of the radar rainfall thus obtained is about $\pm 5.7\%$ when integrated for a period of more than an hour and it corresponds to the raingauge network of about one gauge per 80 km².

1. 緒 言

平面電磁波が球形粒子に当たると粒子にダイポールが誘起して入射波からエネルギーを受取り、その一部分は熱として消費され、他の一部は同じ波長の電磁波として再輻射する。平面波の球形粒子による散乱は Mie, Stratton, Kerr 等により取り扱われ、マイクロ波領域では必ずしも $\lambda/D \ll 1$ の条件が成立つとは限らず、Mie の理論による後方散乱断面積 σ 、全吸収断面積 Q_t は⁽¹⁾

$$\sigma = \frac{\pi D^2}{4\alpha^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1) (a_n - b_n) \right|^2 \quad (1)$$

$$Q_t = \frac{-\lambda^2}{2\pi} R_e \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (a_n + b_n) \quad (2)$$

で表わされる。 D は粒子の直径、 $\alpha \equiv \pi D/\lambda$ である。また a_n, b_n は散乱電磁界の係数で argument が α および m の Spherical Bessel Function で表わされる。 m は粒子の複素屈折率で波長および温度の関数である。この式の計算は複雑であるが、Lowan が特定の m の値について計算した a_n および b_n の表⁽²⁾ を用いて σ および Q_t を求めることができる。

粒子の直径が波長 λ に較べて十分小さい時は α の高次の項を省略することができ、その時の散乱断面積を σ_R で表わすと、

$$\sigma_R = \frac{\lambda^2}{\pi} \alpha^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 D^6 \quad (3)$$

となり、これを一般にレーレー近似といっている。

2. 球形粒子の散乱断面積

実際の雨滴は D の値として 0.1 mm から 5~6 mm の範囲に分布しており、それ以上では落下中分裂してほとんど観測されないが、この大きさでもマイクロ波領域では α が常に十分小さいとはいえ

ない。(3) 式の使える範囲を検討するため、種々の α について(3)式より求めた σ_R と Lowan の表を用いて(1)式より求めた σ_M の比を波長別に計算すると第1図の如くなる。ここで m の値と温度および波長の関係は Debye の方法⁽³⁾ に従って決定した。すなわち複素誘電率を ϵ , その実数部を ϵ' ,

Fig. 1. (a)

Fig. 1. (b)

Fig. 1. (c) The ratio of the back scattering cross section of a raindrop σ_M to the Rayleigh back scattering cross section σ_R predicted by Eq. 3, with $\lambda = \pi D/\lambda$.

虚数部を ϵ'' とすると Saxton⁽³⁾ により,

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_0 + \frac{\epsilon_s - \epsilon_0}{1 + j\omega\tau_0} \quad (4)$$

ここで ϵ_s は static dielectric constant, ϵ_0 は定数で Saxton によると 4.9, また τ_0 は relaxation time で ϵ_s, τ_0 はそれぞれ温度の関数であるから, (4)式は温度をパラメーターとした円となり, 波長に対する ϵ すなわち m の値が求められる。

$|(m^2-1)/(m^2+2)|^2$ の値は波長および温度によりわずかわり, (4)式より種々の温度および波長について計算すると第1表の如くなる。

Table 1. The complex index of refraction $|(m^2-1)/(m^2+2)|^2$ of water as function of temperature and wavelength.

Temperature	Wavelength			
	10 cm	5.7cm	3.2cm	0.86cm
0°	0.934	0.933	0.930	0.880
10°	0.931	0.931	0.929	0.899
20°	0.928	0.928	0.927	0.908
30°	0.925	0.925	0.924	0.913

3. 雨滴の分布

直径 D の雨滴に波長 λ の電波が入射した時の反射断面積の近似値と理論値の比 σ_M/σ_R から実際の降雨についてレーダー反射因子 Z がどのような値をとるかを求めるためには雨滴分布を求めねばならない。

Marshall & Palmer⁽⁴⁾ によると分布 N_D は次式で表わされる。

$$N_D = n_0 e^{-\Lambda D} \quad (5)$$

ここで N_D は直径が D と $D+dD$ の間にある雨滴の数が $N_D dD$ で表わされるような関数であり, 一般には n_0, Λ は雨量の関数であるが, n_0 は雨の種類によりほぼ一定である。 N_D からレーダー反射因子 Z を計算すると,

$$Z = 10^{12} \int_0^\infty N_D D^6 dD \quad (6)$$

ただし Z は mm^6/m^3 , N_D は cm^{-4} , D は cm である。

雨量 R は雨滴がすべて終速度で落下していると

すると N_D と落下速度 v から求められ,

$$R = 3.6 \times 10^4 \frac{\pi}{6} \int_0^\infty N_D v D^3 dD \quad (7)$$

終速度 v は粒子の重力と空気抵抗のつり合いから決まり,

$$v = KD^{1/2} \quad (8)$$

K の値は $1.42 \times 10^3 \text{ cm}^{1/2} \text{ sec}^{-1}$ で直径 4 mm 以上では v はほぼ一定の値となる。次に A を R の関数として

$$A = AR^{-a} \quad (9)$$

とし, また n_0 を R に無関係な常数として (6) 式の積分を行うと,

$$Z = 10^{12} \frac{6! n_0}{A^7} = 10^{12} \frac{6! n_0}{A^7 R^{-7a}} \quad (10)$$

一方 $Z-R$ 関係の雨滴の測定による実測値から $Z = BR^\beta$ の関係があり, $\beta \approx 1.6$ なる結果を用いると,

$$a = 0.228$$

となる。また R の積分は

$$R = \frac{0.6\pi 10^4 \Gamma(4.5) Kn_0}{A^{4.5}} = \frac{0.6\pi 10^4 \Gamma(4.5) Kn_0}{A R^{-4.5a}} \quad (11)$$

したがって,

$$A^{4.5} = 3.105 \times 10^8 n_0$$

$$BA^7 = 720 \times 10^{12} n_0$$

これから種々の B について n_0 および A を計算した結果を第 2 表に示す。

Table 2. n_0 and A as function of Z (of various kinds of constants).

Z	n_0	A
$80 R^{1.6}$	0.35	$61 R^{-0.228}$
$200 R^{1.6}$	0.064	$42 R^{-0.228}$
$300 R^{1.6}$	0.0326	$36 R^{-0.228}$
$400 R^{1.6}$	0.019	$32 R^{-0.228}$
$700 R^{1.6}$	0.0078	$26 R^{-0.228}$

雨滴の測定から得られる B の値は広い範囲に分布しているが, 通常 $80 \sim 400$ でほとんどすべての雨を代表することができるので, 代表的な値とし

Fig. 2. (a)

Fig. 2. (b)

Fig. 2. (c)

Fig. 2. (d)

Fig. 2. Typical plots of raindrop distributions N_D as a function of AD .

て $B=80, 200, 400$ について考えることとする。雨滴の直径を濾紙法で測定し、種々の Z の値について AD を N_D についてプロットしてみると第2図の如くなり、直径の大きな雨滴の例が少いが、少くとも観測データの範囲内では第2表の常数が実測と大体一致していることが分る。

4. Z_M と Z_R の関係

第2表により決まる雨滴分布 N_D を用いて σ_R より求めた Z_R と σ_M より求めた Z_M の比 Z_M/Z_R を雨量 R および波長 λ について計算をする。第3図は雨滴の直径を 0.05 cm ごとに区分して第2表より決まる 0.5 mm から 5.5 mm までの間の N_D を用いて Z_M/Z_R を求めたもので、 X -band (3 cm . 帯) では雨量約 10 mm 以上で約 $+2 \text{ db}$, C -band (5 cm 帯) では約 -1 db , S -band (10 cm 帯) では 0 であり、現在の測定精度では 100 mm/hr 以内で C および

S band 以上ではこの差は無視できることがわかる。耗波においては雨量 10 mm/hr 以上で差が急激に大きくなり、雨量の測定には修正が必要となる。

第2表から求めた N_D は粒径の小さい所で実測とはなれる傾向があるが、 Z の計算の場合は Z が D^6 に比例しているので、その寄与は少なく無視できる。また直径の分布は D の最大値を 5.5 mm として、それ以上の粒子はないものとしてある。

Fig. 3. (a)

Fig. 3. (b)

Fig. 3. (c)

Fig. 3. The ratio of the radar reflectivity Z_R calculated from the back scattering cross section σ_R and drop distribution N_D to the reflectivity Z_M predicted by σ_M and N_D .

5. 雨滴の変形

雨滴の反射断面積 σ の計算は雨滴が球形であるとして行つたが、落下中の雨滴は直径が大きくなるに従つて球から変形している。落下中の雨滴を写真観測⁽⁵⁾した結果によると、平均としては計算値とよく合っており、また分散の範囲は90%以上が軸比で0.6~1.2の範囲に入っている。

円偏波と直線偏波を比較して円偏波の場合の減衰率から軸比を求めた結果⁽⁶⁾によると、減衰率が雷雨の時に14~23 db (中心 18 db)、冬の雨の時に16.5~23 db (中心 18 db)で、軸比にするとそれぞ

れ0.55~1.5 (中心 0.61) および0.6~1.4 (中心 0.61) となつている。写真観測の結果より多少偏平度が大きくでているが、これらの値を用いて変形した水滴の反射断面積をAtlas⁽⁷⁾, Labrum⁽⁸⁾の結果に従つて求めると球形との差は波長1.25 cm~10 cmの間で1.2 db以内である (平均値0.7~1.3 に対しては0.5 db)。

ただし0°Cの融解層においては粒径も大きく、観測された平均の軸比は0.46~1.6となつているので⁽⁶⁾、変形の影響を無視することはできない。

6. 減衰定数について

電波はその伝播途中において大気ガス、雲および雨によつて減衰を受ける。それらの単位距離における減衰係数をそれぞれ k_g , k_c , k_r db/km とすると、減衰を受けない時の受信電力 $\bar{P}_{r0}$ と減衰を受けた時の受信電力 $\bar{P}_r$ の比は、

$$10 \log \frac{\bar{P}_r}{\bar{P}_{r0}} = -2 \int_0^r (k_g + k_c + k_r) dr \quad (12)$$

で表わせる。マイクロ波帯においては波長の短いほど減衰が大きいが、近距離の場合は k_g はほとんど無視できる。

大気ガスでレーダー波の減衰に関係してくるのは酸素と水蒸気である。水蒸気による吸収は、波長1.35 cm および0.2 cm 付近に強い共鳴線があり、その値は水蒸気量に比例し、また温度にもよるが、共鳴線付近を除いては酸素の吸収に比べて小さいので無視しうる場合が多い。

酸素による吸収は0.5 cm に吸収線があり、分圧の2乗に比例する。従つて上空に行つた場合には気圧の補正をする必要がある。第4図は標準大気について高度に対する補正項で、またこの値を用いて水平に出した電波の減衰量を計算すると第5

Fig. 4. The correction factor with height of oxygen attenuation for standard atmosphere.

Fig. 5. The attenuation by oxygen for horizontally radiated wave predicted by the correction factor of Fig. 4.

図の如くなる。

雨域を通過した時の減衰は吸収と散乱によるもので、全散乱断面積は(2)式で与えられる。Lowanの表の Q_i から減衰定数 k_r を求めるには単位距離について単位断面積中のすべての粒子について Q_i を合計すればよい。 k_r を db/km で表わすと

$$k_r = 0.4343 \sum Q_i \quad (13)$$

となる。 k_r を反射断面積 σ の計算に用いた m と λ の関係から波長および粒子直径別に計算すると第3表の如くなる。

Table 3. Attenuations in decibels per km per drop per m^3 .

D, mm	Wavelength			
	0.86 cm	3.2 cm	5.7 cm	10 cm
	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$
0.5	0.0785	0.0035	0.0011	0.0003
1	1.47	0.0402	0.0102	0.0026
1.5	9.03	0.222	0.043	0.0094
2	28.6	0.982	0.135	0.0248
2.5	61.6	3.73	0.371	0.057
3	92.5	12.8	0.923	0.115
3.5	121.	35.1	2.14	0.222
4	153.	55.7	4.89	0.411
4.5	193.	64.3	11.0	0.731
5	238.	80.3	24.0	1.26
5.5	289.	108.	56.9	2.12

(0.86 cm は内挿値, また 3.2 cm, 5.7 cm, 10 cm は Imai⁽⁹⁾ より。)

降雨に対する減衰は雨滴の分布 N_D を用いて計算することができる。 N_D の値は雨の種類により異なるが、平均値を中心としてその上下の3つの値について考えることとする。第2表の値を用いて Z の係数 $B=80, 200, 400$ の3つの場合について減衰を計算すると第6図の如くなる。波長の短い所では雨の種類により同じ降水強度でも減衰定数が違っている。 $B=200$ における値を R の指数関数で表わすと第4表の如くなる。

Table 4. Attenuation constant, k_r in decibels per km.

λ , cm	Attenuation constant, k_r , db/km		
0.86	0.18 $R^{1.1}$	0.22 R	$\triangle \star$
3.2	0.007 $R^{1.3}$	0.0074 $R^{1.31}$	$\triangle$
5.7	0.0013 $R^{1.1} \times$	0.0022 $R^{1.17}$	$\triangle$
10.0	0.0003 $R \times$	0.0003 R	$\triangle$

$\star \lambda=0.9$ cm, $\times$ Imai⁽⁹⁾ による, $\triangle$ Gunn & East⁽¹⁰⁾ による。

雲による減衰は含水量に比例しており、飛行機観測による含水量⁽¹¹⁾を用いて波長別減衰係数を求めると第5表の如くなる。 C_u および C_b に対する減衰が他のものより大きくなっているが、これは局地的に発達していることが多く、電波通路全体について考えると表の値よりは小さくなるだろう。

Fig. 6. (a)

Fig. 6. (b)

Fig. 6. (c)

Fig. 6. (d)

Fig. 6. Attenuation by rain. Solid curves show attenuation in Z of $B=80, 200$ and 400 . Dashed curve shows the values in Table 4.

耗波の場合は減衰量はかなり大きくなり、無視できないが、糧波以上では無視してさしつかえない。

Table 5. Attenuation by water cloud, db/100 km.

雲形 Cloud types	含水量 gr/m ³ (中央値) Water content	λ=10 cm		5.7 cm		3.2 cm		1.24 cm		0.9 cm	
		10°C	0°C	10°C	0°C	10°C	0°C	10°C	0°C	10°C	0°C
A_c, A_c-A_s	0.1	0.056	0.09	0.196	0.27	0.63	0.85	4.06	5.32	6.81	9.9
S_t, S_c	0.22	0.123	0.198	0.43	0.60	1.44	1.88	8.98	11.7	15.0	21.8
C_u, C_b	0.34	0.19	0.31	0.67	0.93	2.14	2.90	13.8	18.1	23.2	33.6

7. 受信空中線の有効面積

空中線の利得，ビーム幅等はその設計により決まるが，有効面積 A_e と利得 G_0 との間には

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_0 \quad (14)$$

なる関係がある⁽¹²⁾。気象レーダーの如く目標が広範囲に存在する場合の受信有効面積を A_m とすると点目標の場合と異なってくる。

θ 方向の利得を G_θ とし，指向特性をガウス分布で近似すると

$$G_\theta = G_0 e^{-0.693 \left(\frac{\theta}{\theta_1}\right)^2} \quad (15)$$

ただし半電力値幅を $2\theta_1$ とし，上下左右対称であるとする。 θ 方向から入射する電波に対する有効面積を $\lambda^2 G_\theta / 4\pi$ で表わすと， θ 方向にある単位体積に対する受信電力 P_r は， Σ を単位体積についての合計として，

$$\Sigma P_r = \frac{P_t G_\theta}{(4\pi r^2)^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_\theta \Sigma \sigma \quad (16)$$

これをビームに含まれている体積全部について合計すると受信電力の合計 $\bar{P}_r$ が得られる。パルス幅を h とすると，

$$\begin{aligned} \bar{P}_r &= \int_0 \frac{P_t G_\theta^2 \lambda^2 r^2 h 2\pi}{(4\pi r^2)^2 4\pi \cdot 2} \Sigma \sigma \sin \theta d\theta \\ &= \frac{P_t h}{8\pi r^2} \frac{\lambda^2 G_0}{4\pi} \frac{G_0 \theta_1^2}{4 \times 1.386} \Sigma \sigma \end{aligned} \quad (17)$$

この時の有効面積を A_m として， $\bar{P}_r$ を

$$\bar{P}_r = \frac{P_t h A_m}{8\pi r^2} \Sigma \sigma$$

で表わすと A_m は，

$$A_m = A_e \frac{G_0 \theta_1^2}{4 \times 1.386} \quad (18)$$

G_0 および θ_1 の関係はパラボラ空中線の場合開口面での電波の位相と振幅の与え方で決まり，その最大指向性の利得 G_0 と開口面積 A_p の関係を係数 f で表わすと，

$$G_0 = \frac{4\pi A_p}{\lambda^2} f$$

となり，これらの関係は Silver⁽¹²⁾ により計算されているのでその値を用いて A_m と A_e の関係を計算することができ，その結果を第6表に示す。

Table 6. Effective receiving antenna cross section for meteorological target.

f	$2\theta_1$	G_0	A_m/A_e	A_m/A_p	A_m'/A_p
1.0	$1.02 \lambda/D$	$9.86 D^2/\lambda^2$	0.461	0.461	0.64
0.75	1.27 "	7.40 "	0.537	0.403	0.56
0.56	1.47 "	5.52 "	0.537	0.301	0.417
0.44	1.65 "	4.35 "	0.533	0.235	0.325
0.36	1.81 "	3.55 "	0.523	0.188	0.26

第6表で A_m' は指向特性が半電力点迄一様な利得 G_0 で，それ以外は0とした場合の有効面積で，

$$A_m' = A_e G_0 \theta_1^2 / 4$$

となる。

8. Z-R 関係

受信電力から降水強度 R を求めるには反射因子

Z との関係が明らかでなければならない。 R は水滴の落下速度を v とすると $D^3 \times v$ に比例するので、 Z と R の関係を求めるには水滴の大きさの分布と落下速度が必要である。水滴の落下速度はその大きさにより定まるので、直径の分布を観測すると、 Z と R の関係が求められる。一般に Z と R の間には

$$Z = BR^\beta$$

なる実験的關係があり、その係数の値は多くの観測結果が出されている⁽¹³⁾。気象研究所において行つた観測結果も $80R^{1.5} \sim 700R^{1.6}$ まで約 10 倍近いばらつきがあるが、一つの降雨についてのちらはりは少く第 7 図の如くである。持続性の雨では、 $B=200 \sim 300$ 、 $\beta=1.6$ で Marshall⁽⁴⁾ は平均値として

$$Z = 200R^{1.6}$$

を与えている。このように $Z-R$ 関係の係数 B および β は雨の種類によつて大体決められ、 $\beta=1.6$ としてさしつかえない場合が多いが、雨量の測定に際しては B を何らかの方法で直接測定すると誤差を少なくすることができる。 B および β の決定には

雨滴の測定の外、雨量と $\bar{P}_r$ との比較によることもできる。雨滴の測定を行うと確実に Z を決めることができるが、現在までに行われてきた方法は雨を濾紙に受け、一粒づつ濾紙の読取を行つてその痕跡の大きさより雨滴の直径を決めるもので、一つのサンプルを求めるにも長い時間と手間を必要とする。一方雨量を地上雨量計で測定し、同一地点の上空からの $\bar{P}_r$ を測定し、両者の比較から Z を求めることは或る程度のばらつきは止むを得ないが、前者より簡単である。この時注意を要するのは、風によつて雨が流されたり落下中に変化を受ける恐れがあることで、なるべく近距離で測定する必要がある。また $\bar{P}_r$ は雨量強度と比較する必要があるのに、通常の雨量計では雨量強度を直接求めることができないので、その記録の微分から求めるか特殊の雨量強度計を用いねばならない。

Z の係数を何らかの方法で、観測しようとしている雨について決定しておくことは雨量測定の精度をあげる上に重要なことである。

9. 波長、空中線の大きさ、出力等と雨量測定範囲について

a) 波長：電波通路の減衰と反射強度、ビーム幅とは相反する特性を有するので、必要な最大距離を決めてからそれに合うように、使用波長を選定しなければならない。距離および大気減衰は受信装置内で補正するとして、雨による減衰を観測距離内において期待する最大の雨に対して 3db 以内とするときの使用波長を第 8 図に示す。点線で示したのは雨の種類による減衰の違いを表わしたものである。ごく近距離の場合を除いては S-band が適している。

b) 空中線の大きさ：観測域内におけるビームが雨域より上空に出ないために設置場所と雨の高さから空中線の縦方向の大きさが決められ(第 9 図)、また必要な最小降水量とレーダー感度から横

Fig. 7. Typical examples of $Z-R$ relation observed from rain drop measurements.

方向の大きさが決められる。雨量測定のためのレーダーとしては、観測距離は余り大きくできないので、感度および横方向のビーム幅は縦方向のビーム幅より要求度は少い。

c) パルス幅： ビーム幅に較べてパルス幅によって決まるパルス長は非常に短いので、マグネトロンの特性上許す範囲内でなるべく長いパルスを使用する。

d) 映像の平均： 受信電力の測定には平均値を用いねばならないことはすでに述べられているが、目視観測または写真観測の場合は視管の螢光物質、肉眼または写真感光材料が蓄積効果を持っているので、ある程度の平均値を観測することになり、特別に平均を作らなくともよかった。雨量を直接求める場合には平均した映像信号を用いねばならない。平均する回数としては $PP1$ 走査の回転数と繰返し周期から制限されるが、10~20回の平均を作れば実用上十分である。

e) 未知係数 F について： レーダーによる雨量観測について Hirschfeld⁽¹⁴⁾ は理論値と実測値との差が2~10 dbあることを指摘し、これを係数

Fig. 8. The range limits where the rain attenuation becomes 3 db or more.

Dotted curves show the upper and lower limits for $Z=80R^{1.6}$ and $400R^{1.6}$.

Fig. 9. The relations between wavelength, antenna dimension, beam width and beam height. For the rainfall measurements, the top of the beam should not exceed beyond the maximum height of rain.

F で表わしている。先に筆者の行つた観測⁽¹⁵⁾では平均した F が $1/8$ となつたが、本論文における有効受信空中線面積と Z_M/Z_R の影響を考慮に入れると、有効面積で約 -1 db, Z_M/Z_R で約 $+0.5$ db だけ F が 1 に近づくことになり

$$F=1/7$$

となる。しかしこの数値については測定のばらつきを考えに入れると、前に出した値と本質的には変つていない。

10. 等雨量線装置による面積雨量

ある面積について全体の強度を知るためには、等雨量線装置が必要であり、その区域の雨量の実態を知るためにはかなりの密度で雨量計を配置しなければならない。また一つの雨量計で測定する雨量がどの位の面積を代表するかは雨の種類にもよるが、まだ結論が出されていない。

大宮付近に配置した雨量観測網は、まだその密度

Fig. 10. An example of radar rainfall contours.
The values on the each points represent the rainfall intensity measured by rain gauge.

が十分とはいえないが、この雨量計網とレーダー等雨量線の比較観測の一例を示すと第10図の如くである。各地点の側にある数値は、雨量計の記録から読取つた雨量強度を mm/hr で表わしたもので、曲線はレーダーによる等雨量線である。

等雨量線図から面積雨量を求めてある区域全体の総降水量を求めると、地点雨量の場合のレーダーによる観測地点と、雨量計との場所の差による誤差がなくなり、また多くの場所の反射の平均が求められるので、地点雨量より精度はよくなる。第7表はレーダー等雨量線図の面積をプランメーターで測定して実雨量と比較した結果で、この場合の実雨量とは各雨量計の10分間雨量を各地点について求めて等雨量線図を作り、レーダーの場合と同様にその面積をプランメーターで測定したものである。

Table 7. Areal rainfall by radar contours, mm.

Time	Radar rainfall	Actual rainfall	Error, %
h m m	mm	mm	
14 20 - 30	1.0	1.07	- 6.5
30 - 40	1.2	0.95	+26.
40 - 50	0.4	0.88	-54.
50 - 00	0.7	0.80	-13.
15 00 - 10	0.6	0.94	-36.
10 - 20	1.1	0.74	+49.
20 - 30	0.6	0.64	- 6.3
30 - 40	0.6	0.76	-21.
40 - 50	0.8	0.75	+ 6.8
50 - 00	0.8	0.78	+ 2.5
16 00 - 10	0.8	0.63	+27.
10 - 20	0.1	0.45	-78.
20 - 30	0.2	0.27	-26.
30 - 40	0.4	0.28	+43.
40 - 50	0.5	0.42	+19.
50 - 00	0.5	0.45	+11.
17 00 - 10	0.4	0.45	-11.
10 - 20	0.4	0.42	- 3.8
20 - 30	0.6	0.35	+72.
30 - 40	0.3	0.38	-12.
40 - 50	0.4	0.43	- 7.
50 - 60	0.4	0.40	0
18 00 - 10	—	0.30	—
Total	12.8	13.23	3.0

計算した面積は、約 638 km^2 で 23 個の雨量計の記録を用いている。またレーダー等雨量線は約 3~6 分間に 1 組のデータを観測しており、その合計値を用いた。第 11 図はこの積算値をプロットしたものである。図の曲線 *C, D, E* は各観測点の代表する面積を定め(第 12 図)、各地点毎に面積雨量を計算したもので、*C* はすべての雨量計の値を用いたもの、*D* は 8 個の雨量計の値、また *E* は 3 個の

雨量計で代表した時の値である。代表する面積は各雨量計を結ぶ直線の垂直二等分線で囲まれる区域をその雨量計が代表するものとした。

これら各種の観測結果を、雨量計等雨量線による面積雨量を真の値として誤差を求め、その標準偏差を比較すると第 8 表の如くなる。この表からレーダー等雨量線図を用いた面積雨量は、この観測では 30 分以上の積算を行えば 観測区域 638 km^2 に

Fig. 11. Areal rainfalls measured by radar iso-echo contours and raingauges vs raingauge isohyetal lines.

Fig. 12. (a)

Fig. 12. (b)

Fig. 12. (c)

Fig. 12. The rain gauge network with their covering area; a) 23 gauges b) 8 gauges c) 3 gauges.

Table. 8. Standard deviation of various kinds of areal rainfall measurements, %.

	Radar	Raingauge		
		23 gauge	8 gauge	3 gauge
10 min. rainfall	33.	5.6	10.3	39.
30 min. rainfall	9.0	4.8	8.4	26.
1 hr. rainfall.	5.7	4.2	5.8	21.

8 個の雨量計を配置した時と およそ同じばらつきを示していることがわかる。すなわち 9 km 間隔に配置した雨量計の精度に相当することになる。

なおこの観測では全観測時間の合計で、各地点の雨量の最大値は 18.1 mm, 最小値は 9.45 mm で割合様な雨であつたが、局地性の雨ではレーダー雨量に相当する雨量計網密度は、これより細くなるものと思われる。ただしそのためには更に雨量計網を密にする必要がある。

第 8 表でレーダーによる 10 分間雨量の精度がかなり悪くなっているが、これはレーダーの等雨量線観測間隔が 3~6 分で 10 分間雨量を求めるためには観測値として 1~3 回の平均となり、その数が少いためと思われる。

この測定に使用したレーダーは波長 3.2 cm の気象レーダーで気象研究所に設置してあるもので、 $Z-R$ 関係の係数としては $B=200$, $\beta=1.6$ を用い、途中の減衰は大気減衰を含めて $0.03 R$ と仮定した (実際には観測後 $S. G.$ の更正を行い、レベルの修正をしたので減衰測定数は $0.02 R$ となり、また等雨量線のレベルも第 10 図の如く端数を生じた。)

11. 結 論

レーダーによる雨量観測の場合に、問題となる事項——レーダー反射因子、気象目標に対する空中線有効面積等を再検討し、修正係数 F としては

1/7 となつた。

等雨量線装置による面積雨量を実雨量と比較すると 30 分以上の積算値を用いるとかなりよい精度となり、今回の測定では相当する雨量計密度は約 80 km² に 1 個の割合に等しかつたが、更に種類の異なる降雨について実験を行う必要がある。

またこの実験は波長 3.2 cm のレーダーを用いたが、減衰の少い C バンドを用いると更に強い降雨までの観測を精度よく行うことができるだろう。

謝 辞

終りに、本研究に当り種々御指導をいただいた今井一郎研究部長に深謝する。また地上雨量の値は東京管区気象台との共同観測のデータを使用したもので、東京管区気象台および熊谷測候所の関係官にお礼申し上げる。

References

- (1) Kerr, D. E., 1951: Propagation of short radio waves. M. I. T. Radiation laboratory series, McGraw-Hill Book Co.
- (2) Lowan, A., 1949: Tables of scattering functions for spherical particles. National Bureau of Standard, Washington.
- (3) Lane, J. A. and J. A. Saxton, 1952: Dielectric dispersion in pure polar liquids at very high radio-frequencies. I. Proc. Royal Society of London, A 213, p. 400.
- (4) Marshall, J. S. and W. M. K. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. J. Met. 5, No. 4.
- (5) Jones, D. M. A., 1959: The shape of raindrops. J. Met. 16, No. 5, p. 504.
- (6) Newell, R. E. and S. G. Geotis and A. Fleisher, 1957: The shape of rain and snow at microwavelengths. Weather Radar Technical Report, No. 28, Dep. Met. M. I. T.
- (7) Atlas, D., M. Kerker and W. Hitschfeld, 1953: Scattering and attenuation by non-spherical atmospheric particles. J. Atmos. Terr. Phys. 3, No. 2, p. 108.
- (8) Labrum, N. R., 1952: The scattering of radio waves by meteorological particles. J. App. Phys., 23, No. 12, p. 1324.
- (9) Imai, I., 1957: Attenuation of microwaves through rain for various drop-size distributions. J. Met. Soc. Japan, The 75th Anniversary Vol. p. 65.
- (10) Gunn, K. L. S. and T. W. R. East, 1954: The microwave properties of precipitation particles. Quart. Jour. Roy. Met. Soc., 80, p. 522.
- (11) Lewis, W., 1951: Meteorological Aspects of aircraft icing. Compendium of Meteorology. p. 1200, Amer. Met. Soc.
- (12) Silver, S., 1959: Microwave antenna theory and design. McGraw-Hill Book Co., M. I. T. Radiation Laboratory Series, No. 12.
- (13) Battan, L. J.: 1959: Radar Meteorology. The University of Chicago Press, p. 56.
- (14) Hitschfeld, W., and J. Bordan, 1953: Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths. Scientific Report, MW-12, McGill University.
- (15) 小平信彦, 1956: 気象レーダーによる降水量の測定. 電気通信学会誌, 第 39 巻, 第 2 号.