

# 降雨による電波の減衰と降雨強度

福 士 清 造

## 1. まえがき

近年、情報伝送量の増大にともない無線通信網の拡大が要求され、使用周波数帯もより高い領域へ伸びて、マイクロ波帯より更に高い周波数領域からミリ波帯までの開発が考慮されるようになって来た。高い周波数帯では広い帯域がとり易いので回線の増加が容易であること、指向性の極めて強い高利得アンテナが簡単にえられるので伝播損失を少なくし、回線相互間の干渉を防止できる等の大きな利点がある。しかし一方、10GHz以下のマイクロ波帯ではあまり問題にならなかった降雨による減衰がマイクロ波帯の高い領域やミリ波帯では伝播特性に非常に大きな影響を与えるため、回線設計の基準としても極めて重要な要素となって来た。

降雨による減衰の研究は理論的にも実験的にも古くから行われており、我が国でも数多くのグループが降雨域を通る伝播試験を行い多くの研究成果を発表している。しかし伝播試験の結果には降雨強度がかならずしも実測の減衰量を説明しえないものや<sup>(1)(2)</sup>、特に弱い降雨での減衰量の測定では実測値が理論値よりもかなり大きく、かつ大幅の変動を記録しているものなどがあり<sup>(3)</sup>、決定的な実験結果は得られていない。また理論的には雨量計の捕捉率、雨滴落下速度の変動や温度変化による減衰量の百分率変化を予想したものや<sup>(4)</sup>降雨強度の時間的・空間的な統計処理による減衰量の予想<sup>(6)</sup>等が報告されているが、瞬時の降雨強度と雨量、減衰量などの関係が余り明らかでなく、また減衰量の実測値と Ryde & Ryde の理論値<sup>(6)</sup>との一致に関していくつかの疑問が提起されている現状である。

降雨による電波の減衰の実験的研究では簡便さのため降雨量測定に転倒ます型雨量計が多く用いられるが瞬時的変動の大きな電波減衰量と降雨強度との関係を明らかにするのに、このような時定数の大きな雨量計で測定した雨量を用いるのは適当でない、筆者らは以前から瞬間降雨強度の重要性を指適してきたが、瞬間降雨強度計の開発が容易でないので、代りに簡単な water blue 法による瞬間降雨強度の測定を試みかなり良い結果を得ることができた。

water blue 法を用いて雨滴の粒度分布を測定し、これと推定降雨量とから降雨による電波の減衰量を計算してみると、その結果は従来の転倒ます型雨量計による降雨強度を用いて Ryde & Ryde の減衰曲線から読み取った減衰量とはかなり違ったものになる。また転倒ます型雨量計の降雨強度を基準にしたのでは減衰量の変動が大きく、従来の多くの結果と同じく、Ryde & Ryde の減衰曲線に一致しないが、water blue 法で雨滴の粒度分布を実測し、これをもとにして減衰量を計算すると Ryde & Ryde の減衰曲線にかなり良く一致する結果が得られる。

## 2. 雨滴の全損失断面積

降雨による電波の減衰量は損失のある誘電体球に電波が入射した場合、この誘電体球による電波の吸収および散乱を取り扱った G. Mie<sup>(7)</sup>および J. A. Stratton<sup>(8)</sup>の理論のもと

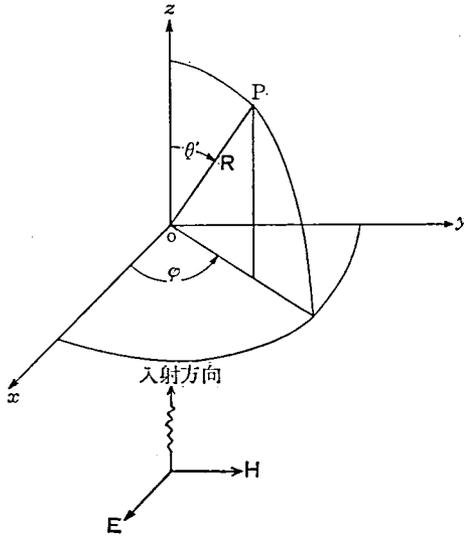


図-1

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{C} + k^2 \mathbf{C} &= 0 \\ \text{ただし } \nabla^2 \mathbf{C} &= \nabla \nabla \cdot \mathbf{C} - \nabla \times \nabla \times \mathbf{C} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

の形のベクトル波動方程式を満足するので、同形のスカラー波動方程式

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \psi + k^2 \psi &= 0 \\ \nabla^2 &= \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left( R^2 \frac{\partial}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{R^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

の解  $\psi(R, \theta, \varphi)$  を用いて表わされるベクトル

$$\mathbf{m} \equiv \nabla \times (\mathbf{R}\psi) \quad (3)$$

$$\mathbf{n} \equiv \frac{1}{k} \nabla \times \nabla \times (\mathbf{R}\psi) \quad (4)$$

はいずれもベクトル波動方程式(1)の解である。また、周知のように、(2)式の解は球 Bessel 関数

$$z_n(kR) = \frac{1}{\sqrt{kR}} Z_{n+\frac{1}{2}}(kR)$$

を用いて

$$\psi(R, \theta, \varphi) = z_n(kR) P_n^m(\cos \theta) \frac{\cos}{\sin} m\varphi \quad (5)$$

と書かれるので、これと(3), (4)式から  $\mathbf{m}$ ,  $\mathbf{n}$  の各値に対して

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{m}_{mn} &= \mp \frac{m}{\sin \theta} z_n(kR) P_n^m(\sin \theta) \frac{\sin}{\cos} m\varphi \mathbf{e}_\theta \\ &\quad - z_n(kR) \frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} \frac{\cos}{\sin} m\varphi \mathbf{e}_\varphi \\ \mathbf{n}_{mn} &= \frac{n(n+1)}{kR} z_n(kR) P_n^m(\cos \theta) \frac{\cos}{\sin} m\varphi \mathbf{e}_R \\ &\quad + \frac{1}{kR} \frac{\partial}{\partial R} [Rz_n(kR)] \frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} \frac{\cos}{\sin} m\varphi \mathbf{e}_\theta \\ &\quad \mp \frac{m}{kR \sin \theta} \frac{\partial}{\partial R} [Rz_n(kR)] P_n^m(\cos \theta) \frac{\sin}{\cos} m\varphi \mathbf{e}_\varphi \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ずいて計算される。Ryde & Ryde はこの理論によって雨滴の全損失断面積を計算し、Laws & Parsons<sup>(9)</sup> の雨滴分布を用いて降雨強度に対する減衰曲線を作った。

雨滴による電波の減衰は電波が雨滴により吸収されて熱損失になるもの、および雨滴から散乱されて受信点に到達しないために損失となるものの二つからなり、おのおのに寄与する断面積の和を雨滴の全損失断面積と称している。

時間因子を  $e^{j\omega t}$  にとれば電磁界ベクトル  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{H}$  等はいずれも

の関係が得られる。ただし  $e_R, e_\theta, e_\varphi$  はそれぞれ  $R, \theta, \varphi$  方向の単位ベクトルである。

そこで水滴を伝播定数  $k_2$  の無限に拡った均一媒質内にある半径  $a$ , 伝播定数  $k_1$  の誘電体球であるとし, これに  $x$  方向に偏った平面波が  $-Z$  方向から入射する場合を考える(図1)。更に簡単のため座標原点を球の中心にとると, 入射波の電界ベクトルは時間因子  $e^{j\omega t}$  を省略して

$$\left. \begin{aligned} E_i &= \alpha_x E_0 e^{-jk_2 z} = E_0 \sum_{n=1}^{\infty} (-j)^n \frac{2n(n+1)}{n(n+1)} (m_{omn}^{(1)} + j n_{emn}^{(1)}) \\ H_j &= \alpha_y E_0 e^{-jk_2 z} = -\frac{k_2 E_0}{\omega \mu_2} \sum_{n=1}^{\infty} (-j)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (m_{emn}^{(1)} - j n_{omn}^{(1)}) \end{aligned} \right\} (7)$$

と表わされる。ただし,  $E_0$  は入射電界の振幅,  $m_{1n}^{(1)}, n_{1n}^{(1)}$  は(6)式において  $\varphi$  の対称性により  $m=1$  としたものの

$$\left. \begin{aligned} m_{1n}^{(1)} &= \pm \frac{1}{\sin \theta} j_n(k_2 R) P_n^1(\cos \theta) \frac{\cos \varphi}{\sin} e_\theta \\ &\quad - j_n(k_2 R) \frac{\partial P_n^1}{\partial \theta} \frac{\sin \varphi}{\cos} e_\varphi \\ n_{1n}^{(1)} &= \frac{n(n+1)}{k_2 R} j_n(k_2 R) P_n^1(\cos \theta) \frac{\sin \varphi}{\cos} e_R \\ &\quad + \frac{1}{k_2 R} [k_2 R j_n(k_2 R)]' \frac{\partial P_n^1}{\partial \theta} \frac{\sin \varphi}{\cos} e_\theta \\ &\quad \pm \frac{1}{k_2 R \sin \theta} [k_2 R j_n(k_2 R)]' P_n^1(\cos \theta) \frac{\cos \varphi}{\sin} e_\varphi \end{aligned} \right\} (8)$$

であり, 添字は  $e, o$  それぞれ偶関数, 奇関数の部分を表わす。またプライムは変数  $k_2 R$  についての微分を表わすものとする。

同様に散乱波の電磁界は, (8)式において  $j_n(k_2 R)$  の代りに第2種の球Hankel関数  $h_n^{(2)}(k_2 R)$  を入れたもの  $m_{1n}^{(2)}, n_{1n}^{(2)}$  を用いて

$$\left. \begin{aligned} E_s &= E_0 \sum_{n=1}^{\infty} (-j)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n^s m_{oln}^{(2)} + j b_n^s n_{eln}^{(2)}) \\ H_s &= -\frac{k_2 E_0}{\omega \mu_2} \sum_{n=1}^{\infty} (-j)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n^s m_{eln}^{(2)} - j a_n^s n_{oln}^{(2)}) \end{aligned} \right\} (9)$$

$R > a$

また, 水滴球内での電磁界は(8)式の  $k_2$  の代りに  $k_1$  を用いて

$$\left. \begin{aligned} E_i &= E_0 \sum_{n=1}^{\infty} (-j)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n^i m_{oln}^{(1)} + j b_n^i n_{eln}^{(1)}) \\ H_i &= -\frac{k_1 E_0}{\omega \mu_1} \sum_{n=1}^{\infty} (-j)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n^i m_{eln}^{(1)} - j a_n^i n_{oln}^{(1)}) \end{aligned} \right\} (10)$$

$R < a$

となる。さらに球面上 ( $R=a$ ) での境界条件

$$\left. \begin{aligned} e_R \times (E_t + E_s) &= e_R \times E_t \\ e_R \times (H_t + H_s) &= e_R \times H_t \end{aligned} \right\} (11)$$

を用い、雨滴の複素誘電率  $N$  を導入して

$$k_1 = Nk_2, \quad \rho = k_2 a, \quad k_1 a = N\rho \quad (12)$$

とおき、(7), (9), (10), (11)式から散乱電磁界の係数  $a_n^s$ ,  $b_n^s$  をきめると

$$\left. \begin{aligned} a_n^s &= -\frac{j_n(\rho) [N\rho j_n(N\rho)]' - j_n(N\rho) [\rho j_n(\rho)]'}{h_n^{(2)}(\rho) [N\rho j_n(N\rho)]' - j_n(N\rho) [\rho h_n^{(2)}(\rho)]'} \\ b_n^s &= -\frac{N^2 j_n(N\rho) [\rho j_n(\rho)]' - j_n(\rho) [N\rho j_n(N\rho)]'}{N^2 j_n(N\rho) [\rho h_n^{(2)}(\rho)]' - h_n^{(2)}(\rho) [N\rho i_n(N\rho)]'} \end{aligned} \right\} (13)$$

となる。したがって、散乱波の電磁界はこの  $a_n^s$ ,  $b_n^s$  を用いて(9)式で与えられることになる。

電磁界がわかると雨滴による吸収および散乱のエネルギーは Poynting の定理から直ちに求められ、その和は

$$W_t = \pi \frac{E_0^2}{k_2^2} \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (a_n^s + b_n^s) \quad (14)$$

となる。そこで、通常行われるように、入射波のエネルギー密度に対する毎秒あたりの全損失エネルギーを全損失断面積  $Q_t$  と定義すれば容易に

$$Q_t = \frac{\lambda^2}{2\pi} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (a_n^s + b_n^s) \quad (15)$$

の関係が得られる。ゆえにある降雨強度のときの種々の大きさの雨滴の数つまり粒度分布がわかれば電波の減衰量を求めることができる。即ちある降雨強度のとき、雨滴半径  $a$  と  $a+da$  との間にある  $1\text{m}^2$  あたりの雨滴数を  $n(a)da$  とし、(15)式的全損失断面積を  $Q_t(a)$  と書けば、デシベルで表わした  $1\text{km}$  あたりの減衰量  $L$  は

$$L = 3.343 \times 10^3 \times \int_0^{\infty} Q_t(a) n(a) da \quad [\text{dB/km}] \quad (16)$$

で表わされる。

### 3. 降雨強度および雨滴粒度分布の測定

降雨強度の測定には感度  $0.5\text{mm/hr}$  の転倒ます型雨量計に感度が  $0.1\text{mm/hr}$  ステップになるように漏斗を付けたものを用いた、また同時に雨量計の直ぐ近くで water blue 紙を5秒間露出して雨滴を受けその痕跡から粒度分布分布を求めた、water blue 紙は直径  $18.5\text{cm}$ 、厚さ  $0.25\text{mm}$  の円形ろ紙(東洋ろ紙 No. 3)にメチルブルーの粉末をガソリンで溶いて浸み込ませたものである。雨滴の落下速度を  $v(a)$  [m/sec] とすると降雨強度  $P$  は

$$P = 1.51 \int_0^{\infty} n(a) v(a) a^3 da \quad [\text{mm/hr}] \quad (17)$$

で与えられ、その平均値は転倒ます型雨量計のますの転倒時間を読み取ることによって求められる。

また water blue 紙に印された雨滴の痕跡と真の大きさとの関係は人工的につくった水滴を約  $5\text{m}$  の高さから落下させ、これを water blue 紙に受けることにより実験的に求めた。水滴が water blue 紙に到達したとき、痕跡の面積がつねに水滴の体積に比例するものとする、水滴の直径  $a$ 、痕跡の直径  $D$ 、ろ紙の厚さ  $b$  の間には

$$A \cdot bD^2 = \frac{2}{3}d^3 \quad (A: \text{比例定数}) \quad (18)$$

の関係が成り立つはずである。ろ紙として  $b=0.25\text{mm}$  のものを用い、水滴の大きさを種々に変えて測定を行ったところ、図2の曲線が得られ、これから  $A=0.28$  であることが知られた。

昭和46年10月11日より47年1月11日までの3ヶ月間の主な降雨について water blue 法による測定を行い、粒度分布と降雨強度を求めた。雨滴半径の区分は Laws & Parsons の区分と同じものを採用し、痕跡の直径はあらかじめ各区分ごとに印を付けたゲージを作っておきこれを用いて集計整理した。

各区分ごとの百分率であらわした粒度分布の例を表1に示してある。尚、最小の雨滴半径として Laws & Parsons の区分よ

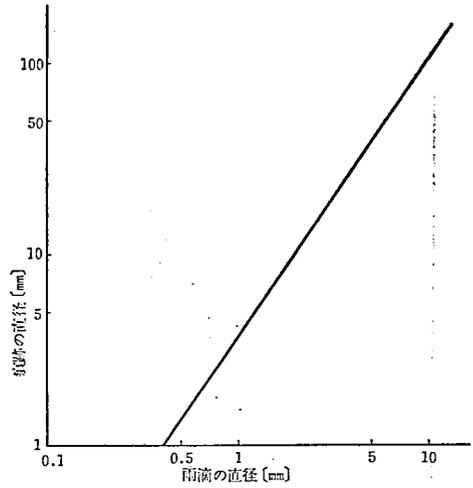


図-2 water blue 紙上の痕跡の直径と雨滴の真の直径との関係  
ろ紙：東洋 No. 3 厚さ 0.25mm

表-1 降雨強度に対する雨滴の粒度分布の百分率

mm/hr \ a[mm]	0.15	2.00	3.00	5.00	9.00	13.00	15.00
0.10	12.0	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0
0.25	53.3	1.2	1.9	4.7	1.1	2.9	1.7
0.50	34.7	44.9	21.7	11.5	8.9	8.2	7.7
0.75		42.6	46.8	17.1	18.4	35.4	13.4
1.00		11.2	22.1	29.3	27.3	27.7	21.3
1.25			7.2	22.0	29.1	16.9	28.2
1.50				15.2	8.4	8.7	15.4
1.75					6.7		12.2
2.00							
2.35							
2.50							

りも 0.1mm 小さいものをとり区分の数を増加してある。表1によると、名降雨の粒度分布の百分率はガウス分布になってないが、これは同一降雨の試料が無いためである。つまり、同一降雨強度かどうかは転倒ます型雨量計ではそれが同一時間間隔でパルスを出していることから明らかであるが、water blue 法では測定した結果を集計してみないとわからないからである。しかし、試料が増えるとガウス分布になることは Laws & Parsons が与えた雨滴の粒度分布の数値を検討してみた結果、ほぼ間違いなさそうである。雨滴の

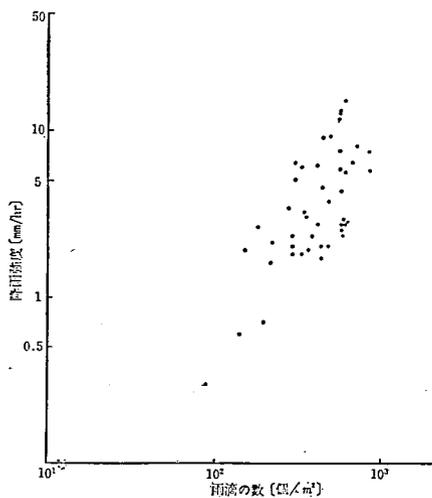


図-3 降雨強度に対する雨滴数分布  
(雨滴半径  $\alpha=0.50\text{mm}$ )

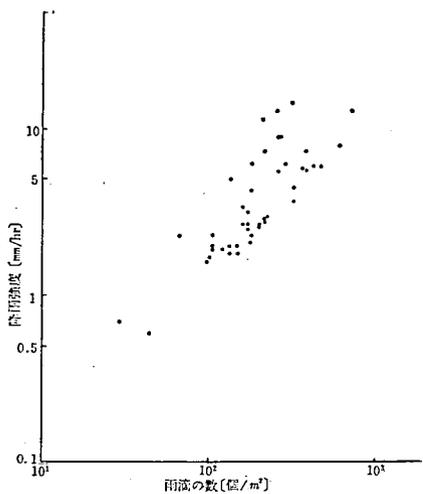


図-4 降雨強度に対する雨滴数分布  
(雨滴半径  $\alpha=0.75\text{mm}$ )

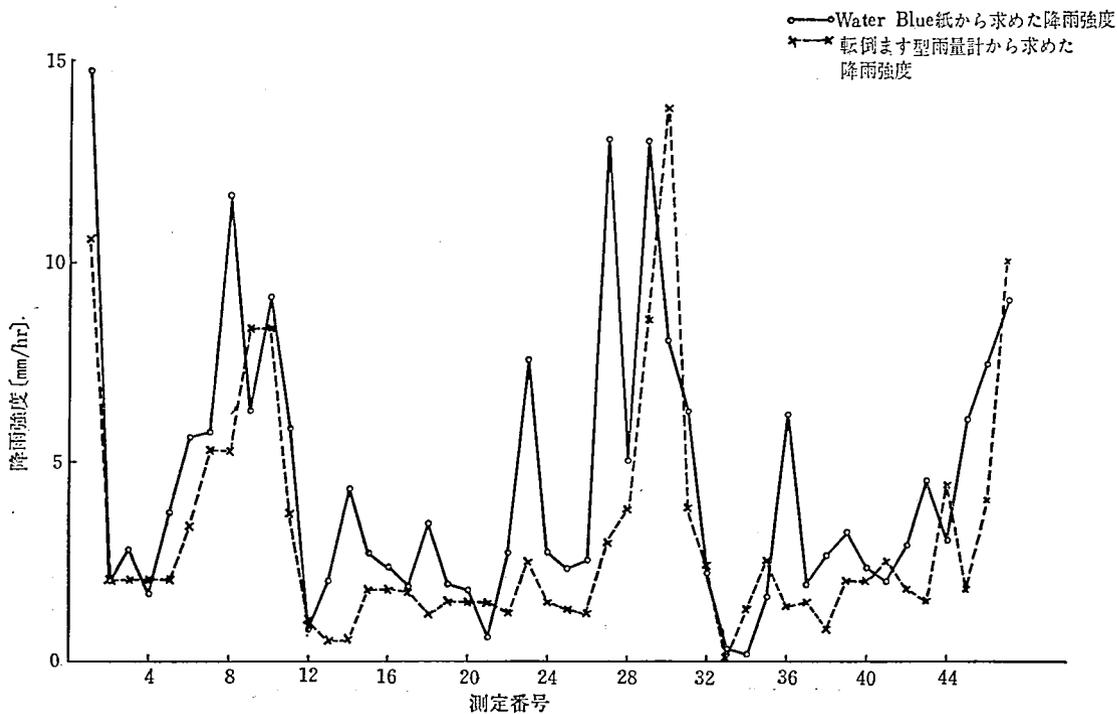


図-5 water blue 紙から求めた降雨強度と倒転  
ます型雨量計から求めた降雨強度の比較

表-2 雨滴の終末速度

雨滴の半径 [mm]	終末速度 [m/sec]	雨滴の半径 [mm]	終末速度 [m/sec]
0.10	0.72	1.75	8.52
0.25	2.06	2.00	8.83
0.50	4.03	2.25	9.00
0.75	5.41	2.50	9.09
1.00	6.49	2.75	9.15
1.25	7.42	3.00	9.21
1.50	8.06	3.25	9.27

表-3 減衰量 [dB/km/drop/m<sup>3</sup>]

$a$ [mm]	$\lambda$ [cm]	434Q ( $a, \lambda$ )			
		$\lambda=0.3$	$\lambda=0.6$	$\lambda=1.0$	$\lambda=1.25$
0.10		$0.245 \times 10^{-4}$	$0.135 \times 10^{-5}$	$0.17 \times 10^{-6}$	$0.46 \times 10^{-7}$
0.25		$8.34 \times 10^{-4}$	$1.74 \times 10^{-4}$	$5.62 \times 10^{-5}$	$2.71 \times 10^{-5}$
0.50		$9.02 \times 10^{-3}$	$3.10 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-3}$	$6.25 \times 10^{-4}$
0.75		$2.18 \times 10^{-2}$	$1.85 \times 10^{-2}$	$6.91 \times 10^{-3}$	$4.91 \times 10^{-3}$
1.00		$4.07 \times 10^{-2}$	$3.85 \times 10^{-2}$	$2.76 \times 10^{-2}$	$1.37 \times 10^{-3}$
1.25		$6.35 \times 10^{-2}$	$6.15 \times 10^{-2}$	$5.53 \times 10^{-2}$	$4.00 \times 10^{-2}$
1.50		$8.90 \times 10^{-2}$	$8.70 \times 10^{-2}$	$8.50 \times 10^{-2}$	$7.60 \times 10^{-2}$
1.75		$1.18 \times 10^{-1}$	$1.22 \times 10^{-1}$	$1.21 \times 10^{-1}$	$1.15 \times 10^{-1}$
2.00		$1.52 \times 10^{-1}$	$1.57 \times 10^{-1}$	$1.58 \times 10^{-1}$	$1.55 \times 10^{-1}$
2.25		$1.90 \times 10^{-1}$	$1.95 \times 10^{-1}$	$1.98 \times 10^{-1}$	$1.95 \times 10^{-1}$
2.50		$2.26 \times 10^{-1}$	$2.39 \times 10^{-1}$	$2.42 \times 10^{-1}$	$2.38 \times 10^{-1}$
2.75		$2.68 \times 10^{-1}$	$2.91 \times 10^{-1}$	$2.94 \times 10^{-1}$	$2.48 \times 10^{-1}$
3.00		$3.07 \times 10^{-1}$	$3.48 \times 10^{-1}$	$3.53 \times 10^{-1}$	$3.30 \times 10^{-1}$
3.25		$3.46 \times 10^{-1}$	$4.15 \times 10^{-1}$	$4.20 \times 10^{-1}$	$3.89 \times 10^{-1}$

粒度分布のうち、半径 0.50mm, 0.75mm の雨滴が 1m<sup>2</sup> あたり 1 秒間に落下した粒数を降雨強度に対して log-log のグラフにプロットしてみると図 3, 図 4 のようになる。図 4 では両者間の直線的な関係がかなりはっきりしているが図 3 ではあまり明らかなでない。しかし、雨滴数  $N(a)$  と降雨強度との間に

$$N(a) = \alpha R^\beta \quad (\alpha, \beta: \text{定数}) \quad (19)$$

の関係が成り立つものとして測定結果から係数  $\alpha, \beta$  を求めてみると、雨滴半径が 0.50mm のとき  $\alpha=180, \beta=0.59$ , 雨滴半径が 0.75mm のとき  $\alpha=70, \beta=0.90$  となり、係数  $\alpha$  は雨滴半径によって異なることがわかる。

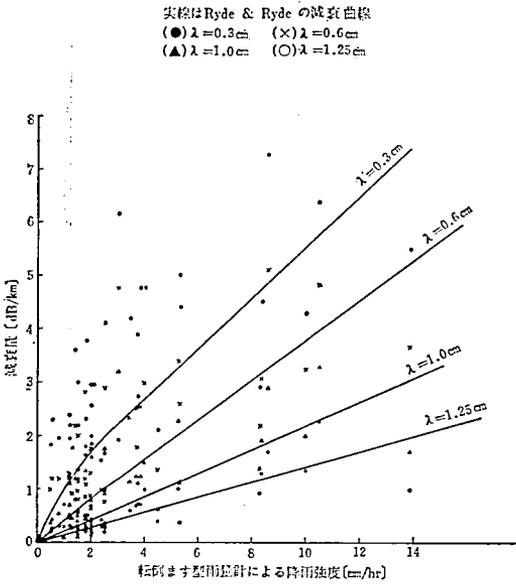


図-6 転倒ます型雨量計で測定した降雨強度に対する減衰量

してどのように異なった影響を与えるかを知るため、0.3cm、0.6cm、1.0cm、1.25cmの4波長について減衰量と降雨強度との関係を求めた。雨滴の落下速度には表2のGunn & Kinzerの値を用い、雨滴数はいずれもwater blue紙による実測値を採用した。従来のように転倒ます型雨量計の降雨強度から求めた減衰量が図6の(●×▲○)印によるプロット、water blue法による降雨強度を用いて計算したものが図7の(●×▲○)印のプロットである。両図とも比較のためRyde & Rydeの減衰曲線(実線)を併せて掲げている。図6と図7を比較して明らかなように、転倒ます型雨量計の降雨強度から求めた電波減衰量はばらつきが非常に大きくRyde & Rydeの減衰曲線と一致しないのに反し、water blue法で測定したほぼ瞬間に近い短時間平均の降雨強度を用いそれから求めた電波減衰量はRyde & Rydeの理論曲線と極めて良

図5は降雨強度を転倒ます型雨量計とwater blue法の二方法で求めて比較したものであるが、図から明らかなように、water blue法によるほぼ瞬間に近い5秒間平均の降雨強度のほうが転倒ます型雨量計によるものよりもかなり大きな値を示している。なお、図5の横軸はwater blue法の測定順に並べたものであって連続した測定値ではない。

降雨による電波の減衰量を算出するためにはさらに雨滴の落下速度が必要であるが、今回はその測定を行わなかったため、Gunn & Kinzer<sup>10)</sup>の測定値(表2)を引用した。ただし、表2には内挿法により算出したものも含めてある。また、表3はRyde & Rydeが $\lambda=0.3\text{cm}$ 、 $\lambda=0.6\text{cm}$ 、 $\lambda=1.0\text{cm}$ 、 $\lambda=1.25\text{cm}$ について(10)式により計算した減衰量の数値に筆者が外挿法で算出した数値をつけ加えたものである。

#### 4. 降雨による電波の減衰量

Water blue法と従来の転倒ます型雨量計の二方法で求めた降雨強度が電波の減衰に対

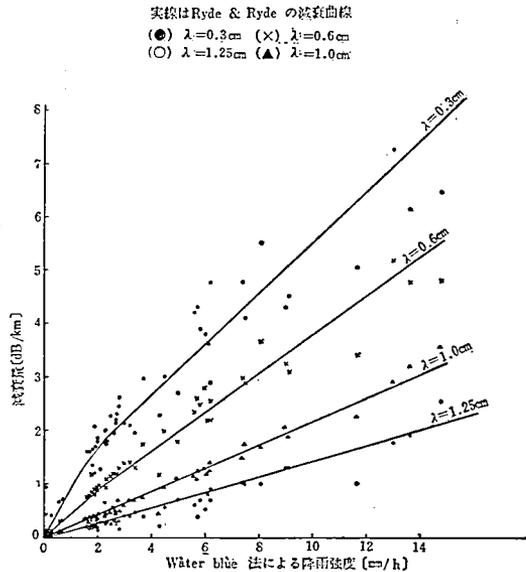


図-7 waterblue法で求めた降雨強度に対する減衰量

い一致を示している。

## 5. むすび

実際に伝播試験を行って得られる減衰量対降雨強度のデータが一般に Ryde & Ryde の減衰曲線よりもはるかに大きな減衰量を示すことはよく知られた事実である。降雨特性を知るために用いられる通常の転倒ます型雨量計では 0.5mm/hr ステップのときは勿論 0.1mm/hr ステップでさえも数分間の平均降雨強度しか測定出来ないで、このような雨量計を瞬時雨量できまる電波の減衰量を知るための降雨強度計として用いることには多大の問題があろう。筆者らは前から瞬間降雨強度の測定の必要性を痛感して瞬間降雨強度計の開発を試みてきたが、未だ長時間安定に作働する装置を得るまでには到っていない。<sup>(4)(5)</sup> 減衰量に関する Ryde & Ryde の理論式そのものについては、寸法わかっている 1 個の水滴や全金属球などを落下させ、そのときのミリ波の減衰量を実測して理論値と比較することにより、その有効性が確かめられている。<sup>(6)</sup>

降雨域内を電波が伝播する場合、電波の受ける減衰は瞬時の降雨強度により決定されるので、短時間 (1~5 秒程度) の平均降雨強度計を用いて雨量測定を行えば、短かい伝播距離即ちその中で降雨強度が一樣であるとみられるような距離での減衰は Ryde & Ryde の減衰曲線に良く一致すること、したがって、これまで云われてきた理論と実験との不一致は雨量計が瞬時降雨強度を示さないことに基くものであることが明らかとなった。しかし、転倒ます型雨量計はやはり有用な雨量計なので、今後に残された問題は、この雨量計を用いた場合、その平均降雨強度から如何にして最大瞬間降雨強度を算出するかということ、ならびに伝播距離が長くなった場合、全区間にわたる降雨強度を少数の雨量計で如何にして有効に測定するかということである。これらはいずれも降雨域内を通る伝播路について電波の減衰量を決定するための重要な要素である。

## 6. 謝 辞

最後に本研究を行う機会を与えて下さった本学金谷教授、常に御指導を賜わる明大築地教授およびいつも激励し助言を与えて下さる東海大森屋講師に感謝の意を表します。またデータ整理などに関しては卒研生小林明君その他の学生諸君の協力を得たことを付記して謝意を表します。

## 7. 参考文献

- (1) 塩谷：交通通信と気象 1961年 地人書館
- (2) R. G. Medhurst : Discussion on prediction of attenuation by rainfall in the 10.-11.7 GHz communication band and Attenuation of 8.6mm wavelength radiation in rain. Proc. IEE, Vol. 114, No. 12, Dec., 1967
- (3) 鶴飼, 森屋：50Gc 帯の伝播試験の中間報告 URSI, 第2分科会, 第120回会合資料
- (4) 西辻：降雨時のマイクロ波およびミリ波帯における伝播損失について 信学論 B, Vol. 54B, No. 8, Aug., 1971
- (5) 大森, 青柳：降雨による電波減衰の一推定式 信学論 B, Vol. 54B, No. 8, Aug., 1971
- (6) D. E. Kerr : Propagation of Short radio waves.

- 8.6, P. 671, 1956, Mc Graw Hill
- (7) G. Mie : Ann Physik, 25, 377, 1908
- (8) J. A. Stratton : Electromagnetic Theory, 1941, Mc Graw Hill
- (9) J. O. Laws, D. A. Parsons : The relation of raindrop size to intensity, Trans. Amer. Geophys Union 24.
- (10) R. Gunn, G. D. Kinzer : The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. J. Met, No. 6, 1949
- (11) 森屋, 福士 : 伝播測定用瞬間雨量計  
昭和43年電気四学会連合大会
- (12) 森屋, 福士 : 伝播測定用瞬間雨量計  
昭和45年電気四学会連合大会
- (13) K. Funakawa : Measurement of total cross section of water drops at 5mm wavelength utilizing the shadow theorem. URSI, 第2分科会, 第116回, 会合資料