

# ミリ波の雨滴粒径分布による減衰特性

福士清造\*

## Attenuation Character by Dropsizes Distribution for Millimeter Waves

by Seizo FUKUSHI

Experimental data relating to radio attenuation due to rain are examined on a short path of 88.5 m propagation using a frequency of 48 GHz.

It has been ascertained that experimental values are in good agreement with Rydes theoretical values as well as the 35 GHz propagation test as nakakawane-machi on 1975. Rainfall intensity patterns correlate fairly well with the radio attenuation pattern.

Judging from the experiment, Laws and Parsons dropsizes distribution is good enough to be useful for the calculation of radio attenuation due to rain. It is necessary to note that atmospheric attenuation for millimeter waves is relatively large for light rain less than 3 mm/hr.

### 1. は し が き

ミリ波の空間伝搬において最も重大な障害となる降雨による減衰が問題になって久しい。

Ryde and Ryde は降雨によるミリ波の減衰に関する理論値を計算により導出した。しかし、多数の人達は伝搬試験の結果から、この理論値は実測値と異なることを報告している<sup>(1)(2)</sup>。

筆者は実測値と理論値とに差異があるとすれば、それはつぎの理由によることを指摘して来た。1. 伝搬試験の際に、いままで用いられてきた雨量計では感度が悪く、時定数が大きくて、瞬間瞬間の降雨強度を正確に示すことが出来ないの、刻々と変化する電波の減衰には対応しないこと。つまり、電波の減衰は降雨の最大値まで記録されるのに、降雨強度は1分間の平均値を示すことが多く、降雨強度が過小評価されている。2. 伝搬試験のための距離が大きくて、伝搬区間で降雨強度が一樣でないため、少数の雨量計では全区間内の降雨強度の平均値は把握できない。すなわち、伝搬区間内での降雨の瞬間最大平均値まで電波は減衰するのに対して、降雨強度は数ヶ所の地点の1分間などの平均値のみを示しているに過ぎない、つまり、降雨強度対減衰の相関関係が悪いのは、降雨の実際の計測が適切に行われていないために生じたものである。

したがって、雨量の計測には感度の良い、時定数の小さい降雨強度計を用いることが必要である。しかし、現状ではこの要求を満す雨量計が必ずしも得られていない。次善の策として伝搬試験の距離は降雨が一樣とみなせる短距離を選定することにより、雨量計と降雨のバラツキの問題は緩和される。さらにミリ波の減衰は降雨強度により決定されるのではなく、その時々々の雨滴の空間粒度分布に依存することである。Ryde and Ryde<sup>(3)</sup> は減衰の計算の基礎として Laws and Parsons<sup>(4)</sup> の測定した雨滴分布を用いた。一部の人達は実際の降雨は Laws and Parsons の雨滴分布よりも粒径の小さい雨滴の分布が相当多くな

\* 理工学部電気工学科講師 電波工学

っているために、Ryde and Ryde の計算値では実測値を説明できないと報告している。これに関して筆者は water blue 法を用いて測定した結果、Laws and Parsons の分布とそれ程大きく違わないことを報告した<sup>(6)</sup>。続いて筆者らは 35 GHz のミリ波を用いて、降雨強度が一様とみなせる程度の短距離において、伝搬試験を行い、その結果 Ryde and Ryde の理論値とほぼ一致したことを報告した<sup>(6)</sup>。

本論文はさらに周波数を 48 GHz にして文献 6 と同様の短距離の伝搬試験を行い、降雨に対する 48 GHz の減衰も Ryde and Ryde の理論値とかなり良い一致をみたことを述べている。また降雨強度対減衰特性が理論値と一致することは Laws and Parsons の雨滴分布もほぼ正しいことの証明になる。他の人達の oil blue 法<sup>(7)</sup>による雨滴分布の測定と筆者や Laws and Parsons の測定した分布をもとにして降雨状態の推定および減衰量を計算してみると、やはり oil blue 法の数値は相当大幅に異なることが分る。

最後に実測値と理論値との間に差異が出るとすれば、それは降雨強度が低い 3 mm/hr 以下の場合に生ずる可能性があること、つまり、現在降雨強度の測定に最も多く使用されている転倒ます型雨量計を 1 パルス 0.05 mm/hr とし、1 分間の平均強度とすると、3 mm/hr 以下の降雨は検出できない。また平均強度も 3 mm/hr ステップとなることと、条件によっては大気中の酸素分子や水蒸気分子による共鳴吸収の減衰は周波数が 48 GHz のときに 2 mm/hr の降雨強度の減衰量と同程度の大きさになるので、大気による減衰を無視すると減衰量は理論値の 2 倍の大きさになるためである。

## 2. 大気および降雨による減衰

ミリ波の大気中の伝搬において基本的な伝搬損失の他に、大気中の酸素分子の磁気ダイポールの共鳴吸収による減衰と、水蒸気分子による電気ダイポールの共鳴吸収による減衰とがある。酸素分子による共鳴周波数は 5 mm と 2.5 mm などにあり、水蒸気による共鳴吸収は 13.5 mm と 1.13 mm などにピークがある。したがって、この周波数付近は減衰が大きく、空間伝搬による通信手段には使用できない。共鳴周波数以外でも減衰は生ずるがかなり軽減される。

酸素分子による電波の減衰は Van-Vleck<sup>(8)</sup>によると

$$\gamma = 10^{6(\log_{10} e)} \frac{8\pi^3 \nu N}{bckT} \frac{\sum_i \sum_j [|\mu_{ij}|^2 \nu_{ij} f(\nu_{ij}, \nu)] e^{-E_j/kT}}{\sum_j e^{-E_j/kT}} \quad [\text{dB/km}] \quad (1)$$

$c$ : 光の速さ,  $k$ : Boltzman 定数 ( $=1.3803 \times 10^{-16}$  erg/°K)

$T$ : 大気の種類 [°K],  $N$ : 1 cm<sup>3</sup> 中の分子の数 ( $=9.66 \times 10^{16} \times P/T$ )

$\nu$ : 入射電波の周波数 [Hz],  $E_j$ :  $j$  状態のエネルギー [cm<sup>-1</sup>]

$\nu_{ij}$ :  $i$ - $j$  遷移の共振周波数 [Hz],  $|\mu_{ij}|^2$ :  $i$ - $j$  遷移に関する双極子モーメント

$$f(\nu_{ij}, \nu) \doteq \frac{\nu}{\pi \nu_{ij}} \left[ \frac{\Delta \nu}{(\nu_{ij} - \nu)^2 + \Delta \nu^2} + \frac{\Delta \nu}{(\nu_{ij} + \nu)^2 + \Delta \nu^2} \right] \quad (2)$$

$\Delta \nu$ : 吸収帯域幅 [Hz]

しかし、 $\lambda$  が  $3.33 < \lambda < 10$  [mm] 以外の範囲では

$$\gamma = 0.34 \left( \frac{\nu}{c} \right)^2 \left[ \frac{\frac{\Delta\nu}{c}}{\left( 2 - \frac{\nu}{c} \right)^2 + \left( \frac{\Delta\nu}{c} \right)^2} + \frac{\frac{\Delta\nu}{c}}{\left( 2 + \frac{\nu}{c} \right)^2 + \left( \frac{\Delta\nu}{c} \right)^2} + \frac{\frac{\Delta\nu}{c}}{\left( \frac{\nu}{c} \right)^2 + \left( \frac{\Delta\nu}{c} \right)^2} \right] \text{ [dB/km]} \quad (3)$$

$\Delta\nu/c$ : line breadth constant [ $\text{cm}^{-1}$ ] で 0.02~0.1 の間

により近似的に求められることが知られており、実測値とも良い一致を示している。

水蒸気分子の電気ダイポールによる共鳴吸収の減衰は 20°C における水蒸気の 5<sub>-1</sub>-6<sub>-1</sub> 遷移線の吸収によるものは

$$\gamma = \frac{0.0035\rho}{\lambda^2} \left[ \frac{\frac{\Delta\nu}{c}}{\left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{1.35} \right)^2 + \left( \frac{\Delta\nu}{c} \right)^2} + \frac{\frac{\Delta\nu}{c}}{\left( \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{1.35} \right)^2 + \left( \frac{\Delta\nu}{c} \right)^2} \right] \text{ [dB/km]} \quad (4)$$

となり、5<sub>-1</sub>-6<sub>-1</sub> 遷移線以外の吸収による減衰は

$$\gamma = \frac{0.012\rho}{\lambda^2} \frac{\Delta\nu}{c} \text{ [dB/km]} \quad (5)$$

ここで  $\rho$  は伝搬通路内の 1 m<sup>3</sup> あたりの水蒸気の量、すなわち、絶対湿度であり、つぎの式で表わすことができる<sup>(9)</sup>。

$$\rho = \frac{0.803}{1 + 0.00367t} e \text{ [g/m}^3\text{]} \quad (6)$$

$$e = E' - 0.0008p(t - t') \quad (7)$$

ここで  $e$  は水蒸気圧 [ $\text{mb}$ ]、 $E'$  は湿球の  $t'$ °C 温度における飽和水蒸気圧 (水に関して) [ $\text{mb}$ ]、 $p$  は気圧 [ $\text{mb}$ ]、 $t$  は乾球の温度 [°C]、 $t'$  は湿球の温度 [°C] である。

$E'$  は 1959年の地上気象観測常用表によると

$$\begin{aligned} \log_{10} E' = & -7.90298 \left( \frac{373.16}{273.16 + t} - 1 \right) + 5.0280 \log_{10} \frac{373.16}{273.16 + t} \\ & - 1.3816 \times 10^{-7} \left\{ 10^{11.344 \left( 1 - \frac{273.16 + t}{373.16} \right)} - 1 \right\} \\ & + 8.1328 \times 10^{-8} \left\{ 10^{-3.49149 \left( \frac{373.16}{273.16 + t} - 1 \right)} - 1 \right\} \\ & + \log_{10} 1013.246 \text{ [mb]} \end{aligned} \quad (8)$$

気圧  $p$  は高さにより変化するので、伝搬通路の高さで変るがミリ波伝搬は 1000 m 以下として、ここでは空気密度を一定として近似すると、高さによる気圧  $p$  の変化は

$$p = 1013 \left\{ 10^{-\left( \frac{0.01454}{293+t} h \right)} \right\} \text{ [mb]} \quad (9)$$

したがって絶対湿度  $\rho$  は

$$\rho = \frac{0.803}{1 + 0.00367t} \left[ E' - 0.8056 \left\{ 10^{-\left( \frac{0.01454}{293+t} h \right)} \right\} (t - t') \right] \text{ [g/m}^3\text{]} \quad (10)$$

となる。式 (8) の飽和水蒸気圧  $E'$  を第一近似にして

$$E' = 6.65 e^{0.06t} \quad [mb] \quad (11)$$

を用いてもそれ程大きな誤差はない。

伝搬試験において降雨中特に夏期には伝搬通路上では水蒸気は飽和状態に近いとみなしてよく、この場合の絶対湿度  $\rho$  は

$$\rho = 5.194 e^{0.0552t} \quad [g/m^3] \quad (12)$$

で表わされる。

雨滴による電波の減衰は G. Mie, J. A. Stratton らによって球状誘電体の電波の散乱や吸収の問題として解かれた<sup>(10)</sup>。入射電波は雨滴により散乱されてエネルギー損失を生ずるものと、雨滴の内部に吸収されて熱に変換されて損失を生ずるものからなり、これらを併せて全散乱断面積として考える。全散乱断面積はつぎのような基本式から導出される<sup>(11)</sup>。

$$Q(a, \lambda) = -\frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (a_n + b_n) \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} a_n &= -\frac{j_n(\rho) [n_c \rho j_n(n_c \rho)]' - j_n(n_c \rho) [j_n(\rho)]'}{h_n^{(2)}(\rho) [n_c \rho j_n(n_c \rho)]' - j_n(n_c \rho) [\rho h_n^{(2)}(\rho)]'} \\ b_n &= -\frac{n_c^2 j_n(n_c \rho) [\rho j_n(\rho)]' - j_n(\rho) [n_c \rho j_n(n_c \rho)]'}{n_c^2 j_n(n_c \rho) [\rho h_n^{(2)}(\rho)]' - h_n^{(2)} n_c \rho j_n(n_c \rho)'} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ここで  $\rho = \frac{2\pi a}{\lambda}$ ,  $a$  は雨滴半径,  $j_n(\rho) = \sqrt{\frac{\pi}{2\rho}} j_{n+(1/2)}(\rho)$

$h_n^{(2)}(\rho) = \sqrt{\frac{\pi}{2\rho}} H_{n+(1/2)}(\rho)$ ,  $n_c = \sqrt{\epsilon_1 - j\epsilon_2} = n_{c1} - jn_{c2}$ , [ ]' は微分したことを示す。

式 (13) (14) から減衰量は

$$\gamma = 434 \int_0^{\infty} n(a) Q(a, \lambda) da \quad [dB/km] \quad (15)$$

ここで  $n(a)$  は単位空間あたりの半径  $a$  の雨滴の個数。

雨滴直径が 0.2 mm 以下の場合には 35~48 GHz ではつぎの式で計算しても 5% 位いの誤差で求まる。

$$\gamma = \frac{0.438M}{\lambda^2} \quad [dB/km] \quad (16)$$

ここで  $M$  は雨滴の全水量  $[g/m^3]$ 。

### 3. 伝搬試験

試験発振器と受信機は約 90 m の伝搬距離に設置した。この距離は降雨が自然に近い状態で降り、しかも伝搬通路内で様な降雨強度とみなせるような気象条件を考えに入れたためである。伝搬距離が短かい程降雨強度の一樣性は高まるけれども、距離が短かくなると電波の伝搬損失は少なくなるが、降雨による減衰も小さくなり、送受信機の高い安定度が要求され減衰量の読み取りがむづかしくなるので、今回の試験でも 88.5 m の距離が短かい方の限界であった。

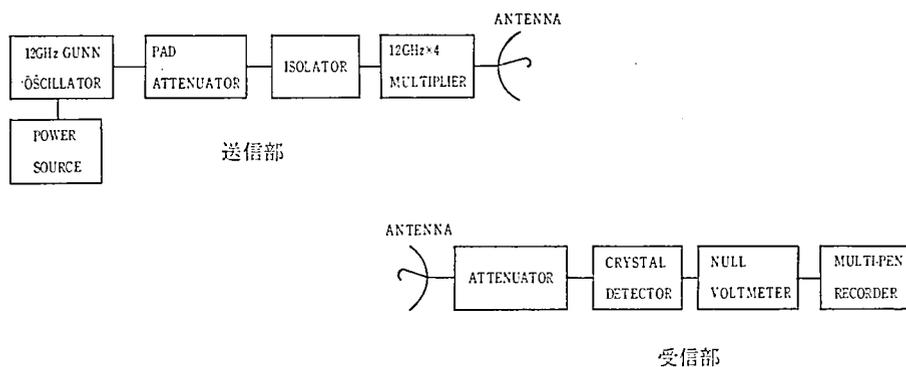


図1 48 GHz 送受信機の構成

試験場所は年間の降雨量の多い所が望ましい。適地とは云えないが東京付近では比較的降雨が多いとされている八王子市と日野市の境界の多摩丘陵地帯にある当明星大学構内に選んだ。

試験発振器および受信機は図1のような構成から成る。発振器は 12 GHz ガン発振器(出力 250mW)で、これをパッド抵抗減衰器とアイソレータを通して、出力電力 100mW にしてから通倍器に入れて、4通倍して48GHzを取り出した。通倍器の出力側で約12mWの電力を得ている。これを直径 60cm のパラボラ・アンテナに給電している。パラボラ・アンテナは送受信とも同一寸法であり、利得は約 43 dB で、アンテナの中心までの高さは 1.35 m ある。受信機はアンテナ、可変抵抗減衰器とヌル電圧計からなり、電圧計の出力をペンレコーダに入れて記録を取るという簡単なものである。使用偏波は垂直偏波を用いた。

雨量計は気象庁検定済の 1 パルス 0.5 mm/hr の転倒ます型雨量計に感度拡大の漏斗を取付けて、1 パルス 0.05 mm/hr にして用いた。また降雨強度の記録は雨量計のパルスに応じて電圧が階段状に上昇する電磁カウンタより求め、電磁カウンタは 30 秒または 1 分間隔でリセットするためにファンクションゼネレータをタイマーとして用いた。

電波の減衰量は降雨の直前と直後に減衰器により較正した二回の平均値を基準にした。

#### 4. 測定結果

48 GHz の短距離での伝搬試験は 52 年 7 月から 10 月までの 4 ケ月間に断続的に行った。降雨強度に対する減衰の測定例を図 2 に示してある。この図の両者の相関係数を求めたら  $\rho=0.92$  となり、極めて良い相関関係を示していることが分った。また図 3 には測定値を集計してプロットしたもの、プロットの平均の減衰曲線(実線)と Ryde and Ryde の他の波長の理論値から内挿した推定理論値(鎖線)を併せて描いてある。

伝搬通路内での降雨強度の一様性を調べるために、50 年に静岡県中川根町藤川における伝搬試験(東海大学森屋助教授との協同実験)の際に送信側と受信側に転倒ます型雨量計(1 パルス 0.05 mm/hr)を設置して、約 90 m の距離で 2 個の雨量計の 1 分間の平均降雨強度の相関係数を求めたところ  $\rho=0.98$  となった。すなわち、90 m 位いの短距離では区間内での降雨強度は上記した雨量計の感度では一様とみなしてよいことが分った。さらにこの距離で 2 雨量計と 35 GHz の降雨と減衰との重相関関係を求めたら  $\eta=0.90$  で

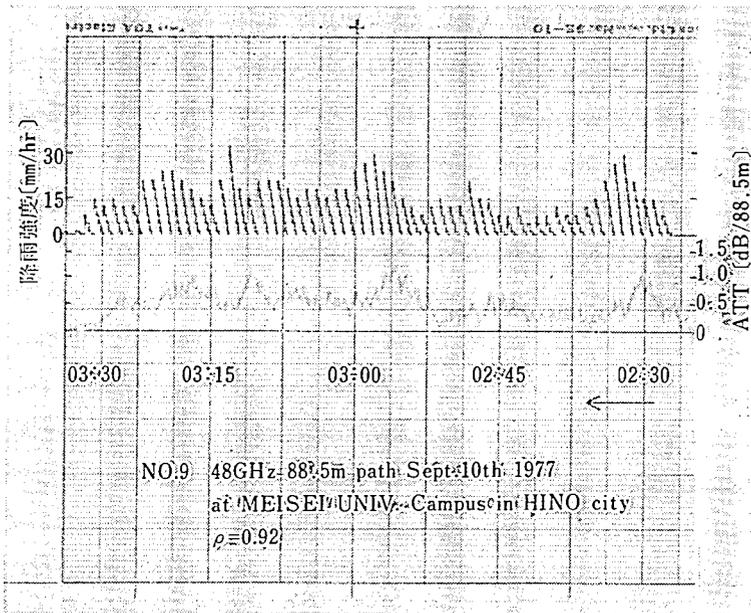


図2 降雨強度対減衰量

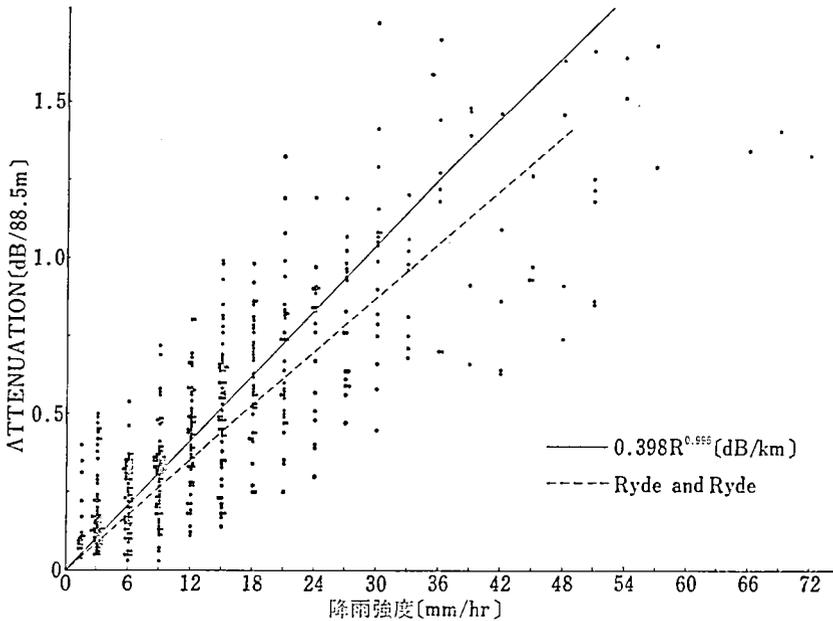


図3 48 GHz の降雨強度対減衰量

あった。

つぎに 35 GHz および 48 GHz における降雨強度に対する減衰を集計して作った実験式と、Ryde and Ryde や浅利らの計算した理論値からの推定べき乗回帰式とを比較したのが表1である。

表 1 減衰の実験式と理論式の比較

周波数	降雨回数	測定数	平均 相関係数	実験式 [dB/km]	理論式 [dB/km]
35 GHz	19	504	0.89	$0.276R^{0.990}$	$0.241R^{0.999}$
48 GHz	8	602	0.83	$0.398R^{0.996}$	$0.389R^{0.952}$

### 5. 雨滴分布より減衰量の算出

いままで雨滴分布の測定結果や予想分布式が多く報告されている<sup>(12)(7)</sup>。筆者の water blue 法による測定結果では、Laws and Parsons の分布に近いものが得られたことを発表した。しかし、既に発表されている人達特に上智大の oil blue 法による測定結果では微水滴の範囲の分布が筆者や Laws and Parsons の値よりも大幅に多くなっている（文献7の図 12, 13 より数値を読み取った）。

三者の値にもとずいて直径 0.25 mm 以下の微水滴の雨滴分布に限定して波長 6 mm のミリ波の減衰を計算した。その結果から降雨量全体からみた 0.25 mm 以下の雨滴の空間体積百分率、個数および減衰量の百分率などを表 2 に示してある。なお筆者の数値は Laws and Parsons の値とほぼ等しいので代りに筆者の測定値の中で最も微水滴の分布が多いデータを記載しているので注意を要する。また三者とも同一降雨強度の数値が得られてないので正確な比較はできない。

表 2 直径 0.25 mm 以下の微水滴分布に対する降雨量全体からみた減衰の百分率

	降雨強度 [mm/hr]	空間含水量 [mm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	体積百分率 [%]	雨滴数 drops/m <sup>3</sup>	減衰百分率 [%]
Fukushi	0.05	14.70	97	1800	96
	0.25	6.52	18	797	9.6
	2.50	21.16	17	3200	3.2
	5.00	6.47	2.5	790	0.4
Laws and Parsons	0.25	0.735	3.2	90	1.0
	1.25	1.84	2.0	225	0.5
	2.5	2.20	1.4	270	0.3
	12.5	3.67	0.6	450	0.1
Sophia UNIV.	25.0	0	0	0	0
	1.13	203	72	$1.39 \times 10^5$	39
	3.06	1809	92	$1.62 \times 10^7$	79
	6.56	1931	79	$1.57 \times 10^7$	85
	32.17	29978	95	$3.79 \times 10^5$	85

(体積百分率は降雨量全体からみた直径 0.25 mm 以下の雨滴の体積の百分率、減衰百分率も同じ。減衰は  $\lambda=6$  mm のとき。)

表 2 の数値と比較のために、いままでに発表された気象観測資料<sup>(13)</sup> から最大級の霧雨、輻射霧、海霧の空間含水量と個数などを表 3 に示した。

48 GHz での推定による Ryde and Ryde の理論値 (Laws and Parsons の分布) と筆

表 3 最大級の霧雨, 輻射霧, 海霧の空間含水量と個数

	空間含水量 [mm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	個数 [drop/m <sup>3</sup> ]	直径 [mm]
霧雨	82 (0.15mm/h 相当)	1.6×10 <sup>4</sup>	0.1~0.33
輻射霧	1000	5×10 <sup>7</sup>	0.03
海霧	2200	5.3×10 <sup>8</sup>	0.01~0.03

表 4 筆者の値と Rydes, 上智大の値との Rydes 値との減衰量の比較

降雨強度 [mm/hr]	Attenuation [dB/km]			*Fukushi	Sophia Univ.
	*Fukushi	Ryde	Sophia Univ.	Ryde	Ryde
1.13	0.45	0.48	0.62	1.02	1.3
3.06	1.21	1.26	2.82	1.07	2.2
6.56	2.59	2.63	4.19	1.11	1.6
32.17	12.63	10.51	42.95	1.19	4.1

(\*印は λ=6.25 mm 他は λ=6.0 mm の数値)

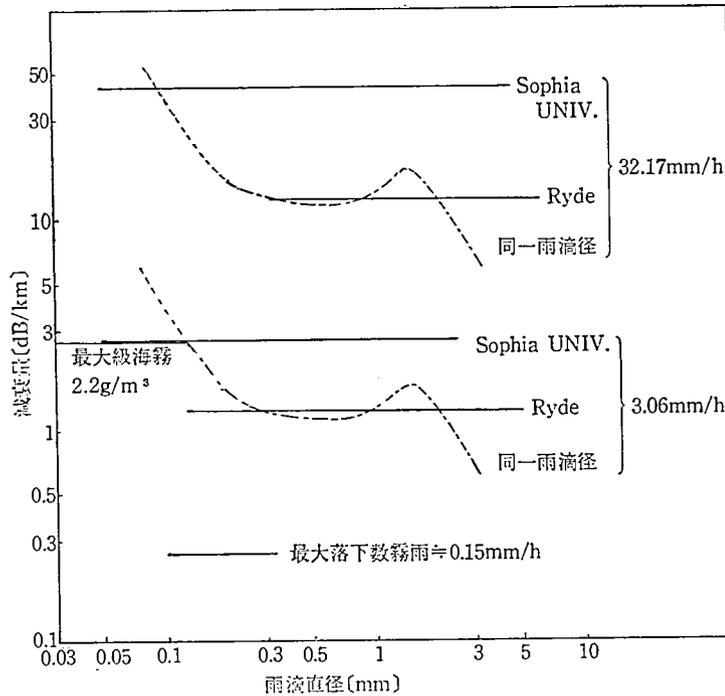


図 4 雨滴分布と 48 GHz の減衰量の比較

者の微水滴分布が最も多いデータからの値と上智大の測定した分布からの減衰との比較を行ったのが表 4 である。波長がデータによって多少違っているので単純な比較はできない。降雨強度 3.06 と 32.17 mm/hr のときの上智大の雨滴分布による減衰と比較のため、

Laws and Parsons の分布、降雨全体が同一直径の雨滴と仮定した場合、最大落下数の霧雨および海霧の水滴分布と減衰を表したのが図4である。

## 6. 考 察

48 GHz および 35 GHz の伝搬試験の結果、降雨強度対減衰の相関係数は平均して  $\rho=0.83$  と  $\rho=0.89$  とかなり良い。しかし、極めて良いとは云えない、これは雨量計の感度が1パルス 0.05 mm/hr であるために、1分間の平均降雨強度にすると 3 mm/hr ステップに相当し、3 mm/hr 以下の強度は計測できない。すなわち、雨量計の感度が悪い上に1分間の平均降雨強度では時定数が大きくて、刻々と変化する電波の減衰に降雨強度が追従しないために生じたものである。

図3の減衰曲線の比較において Ryde and Ryde の曲線（鎖線）よりも筆者の曲線（実線）が降雨強度が多くなるに従って減衰が多くなっており、30 mm/hr では約 20%も多い。しかし、プロットからのべき乗回帰曲線式を求めると Ryde and Ryde よりも小さくなる。すなわち、降雨量の多いところのデータが不足していることもあるが Ryde and Ryde の曲線とそれ程大きな差はないといえる。

表2の直径 0.25 mm 以下の雨滴分布に対する三者の比較において、筆者の最も偏っている値と Laws and Parsons の分布を比べてみると、当然筆者の数値の方が大きい。しかしその差は僅少である。上智大の分布と Laws and Parsons の分布の比較では、その比が極端に異なることが分る。表3の気象観測資料から推定すると、上智大の 1.13 mm/hr の降雨は高度 200 m での最大落下数の霧雨よりも2倍以上も濃い霧雨にさらに普通の雨が重畳された状態を示していることになる。これは Laws and Parsons の値よりも 100 倍も多い。上智大の 3.06 mm/hr の場合は最大級の海霧と同等の霧雨に普通の雨が重なって降っているようになる。Laws and Parsons は 25 mm/hr 以上の雨では直径 0.25 mm 以下の雨滴は無視できる程少ないとしている。これに対して上智大の 32.17 mm/hr の場合は直径 0.25 mm 以下の雨滴分布が最大級の海霧 ( $2.2 \text{ g/m}^3$ ) の 10 倍以上も濃い霧と霧雨と普通の雨が混合して降っている状態を示している。これは最大落下数の霧雨と比べると 2万 3000 倍の濃い霧雨と普通の雨が重なって降っていることになる。すなわち、今までの内外で water blue 法と flour method などの雨滴分布の測定に誤差があったとしても、これ程大幅に数値を変える結果が出るとは考えられない。したがって上智大の数値には疑問がある。

上智大の雨滴分布が正しいならば、表4から Ryde and Ryde の減衰よりも  $\lambda=6 \text{ mm}$  で、32 mm/hr のときデシベル比で 4 倍も多い減衰量を示すことになる。しかし筆者の 0.25 mm/hr のときの雨滴分布の測定値で、直径の小さい方に分布曲線が最も片寄った数値(表2)を例にすると、Laws and Parsons の分布よりも空間含水量が 10 倍も多いが減衰量に換算するとわずか 10%の増加に過ぎない。また通研<sup>(4)</sup>の実測値 (20 GHz で 60 mm/hr の降雨のとき最も差が大きい) でも理論値よりもデシベル比で 25%多いだけである。

つぎに各降雨に対する大気中の酸素分子による  $\lambda=6 \text{ mm}$  の共鳴吸収の減衰は式(3)によると 0.57 dB、水蒸気分子による共鳴吸収の減衰は東京の夏で温度が 30°C 位いの状態で、絶対湿度は  $30 \text{ g/m}^3$  にもなるので式(4)より 0.133 dB となり、両者の和は 0.7 dB 以上となる。降雨強度が 2 mm/hr のときの  $\lambda=6 \text{ mm}$  の減衰は 0.86 dB/km 位いであるから、

大気中の減衰と降雨による減衰とは同程度になることが分る。つまり大気中の酸素や水蒸気による減衰を無視するとみかけの降雨による減衰は2倍になる。

## 7. むすび

降雨強度が一樣と考えられる約 90 m の短距離伝搬試験により降雨による減衰を測定した結果、48 GHz でも Ryde and Ryde の理論値と良い一致を示すことが確認された。Laws and Parsons の雨滴分布と実際の雨滴分布に多少の違いがあっても減衰量に換算するとそれ程大きな差にはならないことから、Laws and Parsons の分布は平均的な雨滴分布として用いることができる。降雨強度が 3 mm/hr 以下の場合は大気中の酸素分子や水蒸気分子の共鳴吸収による減衰は相対的に大きく軽視出来ないことが分った。

## 8. 謝 辞

本研究を行うに際して機会を与えて下さった本学木名瀬教授、常に御指導を賜わる明治大学築地教授に感謝します。またいつも激励し忠告して下さいる東海大学森屋助教およびデータ整理などに協力して下さいる卒研究生伊藤長志君その他の学生にも付記して謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 鶴飼重孝, 島田一雄, “ミリメートル波の微水滴による吸収について”, 信学会アンテナ伝搬研究会資料, AP-70-21, June 1970.
- 2) K. Funakawa, J. Kato, “Experiment studies of propagation characters of 8.6 mm waves on the 24 km path”, Journal of the radio research Lab. Vol. 9, No. 45, Sept 1962.
- 3) J. W. Ryde, D. Ryde, “Attenuation of centimeter and millimeter waves by rain, hail, fog and clouds”, GEC Report No. 8670, May. 1945.
- 4) J. O. Laws, D. A. Parsons. “The relation of raindrop-size to intensity”. Trans American Geophysical Union, Vol. 24, p. 452, 1943.
- 5) 福土清造, “ろ紙法による雨滴分布の測定”, 明星大学研究紀要理工学部, 第12号 p. 77, 51年1月.
- 6) 福土清造, “短距離伝搬路での降雨によるミリ波の減衰”, 明星大学研究紀要理工学部第13号, p. 61, 52年2月.
- 7) 鶴飼重孝他, “ミリ波伝播に関する雨滴の諸特性” 信学技報 Vol. 76, No. 186, p. 61, 1976年12月.
- 8) J. H. Van Vleck, “Propagation of short radio waves”, Vol. 13, p. 646, Boston technical publishers Inc.
- 9) 太田, 篠原, “気象観測技術”, p. 204, 38年9月, 地人書館.
- 11) J. A. Stratton, “Electromagnetic theory”, p. 569, 1941, McGraw-Hill.
- 11) H. Goldstein, “Propagation of short radio waves”, Vol. 13. p. 671, Boston technical publishers Inc.
- 12) 西辻昭, “降雨時のマイクロ波およびミリ波帯における伝搬損失について”, 信学論, Vol.54-B, No. 8, p. 482, 1971.
- 13) 黒石大助, 大喜多敏一, “最近の霧の研究とその展望”, 気象研究ノート, Vol. 10, No. 5, p. 247, 1959.
- 14) 小口知宏, 細矢良雄, “雨滴による電波の散乱吸収”, 信学誌, Vol. 60, No. 4, P. 368, 1977.