

雨滴粒径分布式の違いによる

ミリ波の減衰の比較

福 士 清 造*

Comparison of millimeter waves attenuation by formulas of raindrop-size distribution

by Seizo FUKUSHI

This paper described that on the comparison of the radio attenuation of 48 GHz due to rain, there is little variation between three, my results of propagation tests, the calculated results of Laws and Parsons' distribution, and that of Joss' distribution of drizzle in the light rain region. When precipitation rate is 1.25 mm/hr, attenuation due to rain of Joss' distribution is 1.3 times larger than that of Laws and Parsons' distribution at 100 GHz.

The volume of reaching ground by Joss' drizzle is 8-16 per cent less than the intensity of inserted precipitation and amount of liquid water per unit volume of air is 10-20 per cent more than the intensity of inserted precipitation but drop-size intervals is 0.125 mm radius.

There are some questions in Joss' distribution of drizzle when precipitation rate is 50-150 mm/hr, because in my previous measurement of water blue method, the drizzle was usually small intensity of rainfall.

When precipitation rate was high, radio attenuation by the 48 GHz propagation test was slightly larger than theoretical values of Laws and Parsons, and Joss' distribution.

1. はしがき

電波の空間伝搬を介しての情報伝達の需要が著しく増加した現在、使用出来る周波数は 10 GHz 以下では、既に飽和状態にあり、新しくミリ波帯領域を開拓しなくては要求を満すことが不可能になりつつある。このためにはミリ波帯の電波伝搬の実態を把握しておくことは必要にして不可欠である。

ミリ波の降雨減衰と降雨強度との関係については、各方面での伝搬試験の結果から収集した統計値や推定値なども出されているが、それでも実験値と理論値との間に差異があり、まだ良く解明されていない。

ミリ波の降雨減衰に関する重要な要素の一つは雨滴の粒径分布という気象学的な数値である。現在のところこれが精確に把握されていないことにある。これまで雨滴の粒径分布は Laws and Parsons (以下では L-P と記す) が flour-method により測定した数値から¹⁾、近似値を出したものが Ryde の理論値の基準になっていた。

ところが、小雨または微小雨のときに L-P 分布を基にして計算した減衰量と実際の減衰量との間に大きな差異があり、それは実際の降雨には L-P 分布では表わせない、微小雨滴が多量に存在しているとする意見があった²⁾。

* 理工学部電気工学科講師 電波工学

これに対して筆者は前の論文³⁾で、小雨時にも、1. 微小雨滴の存在は減衰に影響を与える程大きいものでないこと、2. 微小雨滴よりも大気中の温度と湿度の素因により、場合によっては減衰量が2 mm/hrの雨に相当する程減衰することがある、3. L-P分布はそれ程精度は高くないがほぼ実際の減衰量を求めるには有効な分布式であることを明らかにした。

最近になって、L-P分布は降雨全般の平均的な数値で、実際の降雨は状態により粒径分布にかなりの変動があり、ミリ波の降雨減衰の基準にはならないとする意見がある⁴⁾。実際の降雨に近い雨滴分布として、Jossらの実験式から求めた分布が140 GHzでは降雨減衰をよく説明しているという報告、つまり、Jossらは降雨によって粒径分布は「霧雨」と「普通の雨」、「夕立」の場合の三形態に分類して、それぞれに対応する分布式の定数を表わしている⁵⁾。この実験式は対数直線形をしており「霧雨」では、L-P分布よりも粒径の小さい雨滴が多く含まれる式となり、「普通の雨」はL-P分布に近く、「夕立」ではL-P分布よりも粒径の大きい雨滴が多く含まれるように表わされている。

本論文では50 GHzにおける降雨の減衰を実験値とJossらの分布やL-P分布から求めた減衰と比較を行い、Jossらの分布には、降雨の適用範囲が明らかでないこと、空間粒径分布から降雨量を逆算すると、相当大きな差が生ずることや、これらの分布で計算した減衰量はL-P分布の値と本質的には変らないこと、また筆者の48 GHzでの伝搬試験の結果によると、降雨強度の大きいときのデータが不足で、はっきり断定はできないが、L-P分布よりもかなり減衰量は多く、Jossらの「霧雨」の式の分布とみかけ上はほぼ一致している。しかし、Jossらの「霧雨」の分布は降雨強度が大きい場合にも適用できるかどうかは疑問があることを述べている。

2. 実験の概要

ミリ波の降雨減衰と降雨強度を求めるために、周波数は酸素分子の吸収帯近くの電波の窓といわれている帯域でも、割合と減衰量の多い方に該当する48 GHzを使用した。以下にその実験装置の回路構成および測定条件などを述べる。

2.1. 実験装置の構成

48 GHz 発信部および受信部の構成は図1のような極めて簡単なもので、受信感度もあまり高くない。原発信器は12 GHzのガンダイオードで出力は約120 mWを得ている。これをアイソレータとパッド抵抗器を通して、通倍器の入力に100 mWを供給している。通倍器は入力12 GHzを4倍して、出力は48 GHzで約5 mWを得ている。さらにこの出力の一部を20 db方向性結合器により取り出してモニタにしている。方向性結合器の先には直径60 cmのパラボラ形アンテナを取付けている。一次放射器は導波管を切断し

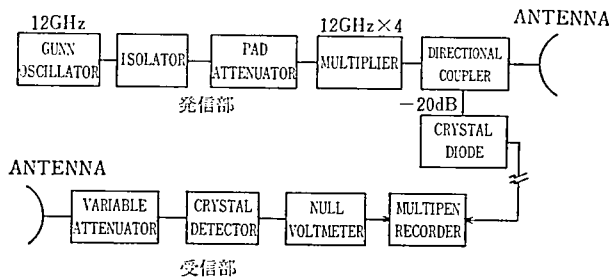


図1 48 GHz 発信部と受信部の構成

たものを焦点に固定してある。パラボラの面精度はあまりよくないので利得は約 40 dB である。

受信部は発信側と同一のアンテナを取付けてある。これから可変抵抗減衰器を通して、クリスタルダイオードにより検波して、直流マルチ電圧計で増幅して出力電圧をマルチペンレコーダに入れて、受信電圧の記録をとった。

2.2. 測定条件

測定場所は明星大学構内（東京都多摩丘陵）の空地で標高は約 90 m のところである。発信および受信用アンテナの高さは 1.35 m と低くしてある。これは風による雨滴の斜め落下と形状の変形を防ぐようにし、また降雨の捕捉率が低下しないようにして、正常な雨滴形状で正確な降雨強度を測定できるように考慮したためである。伝搬距離は降雨強度の一樣性を保つ範囲内として 89 m を選んだ。

この区間に気象庁検定済みの直径 20 cm の転倒ます型雨量計と、この雨量計と同じものに拡大漏斗をつけて 1 パルス 0.05 ミリと 0.1 ミリの感度を有する 3 台の雨量計を設置して、1 分間の平均降雨強度を求めた。このほかに風杯型風程式風速計と温度計、湿度計を観測小屋に取付けてペンレコーダで同時に記録を取った。発信および受信用パラボラアンテナは雨にぬれないように上部と左右に防水用の覆を設けて鏡面や一次放射器を保護した。また伝搬試験の区間は凹凸のある地面で一部に草が生えているので地面からの電波の反射はほとんどない。周囲にも電波を反射するものは測定器を収納している観測小屋が高次のサイドロープを受ける程度の所にあるため測定に影響はなかった。測定は降雨の前後に受信部の可変抵抗減衰器を加減して受信レベルの校正をした。使用偏波は垂直偏波である。

3. 雨滴による電波の減衰

電波が伝搬中に降雨によって生ずる減衰は、伝搬区間内では降雨強度を一樣とみなしたときに、Ryde はつぎの式で与えられることを報告している。

$$\gamma = 4343 \int_0^{\infty} n(a) Q(a, \lambda) da \quad [\text{dB/km}] \quad (1)$$

$$n(a) da = \frac{m(a) \frac{4\pi}{3} a^3 v(a) da}{\int_0^{\infty} m(a) \frac{4\pi}{3} a^3 v(a) da} = \frac{15.1 m(a) v(a) da}{P} \quad (2)$$

$$Q(a, \lambda) = -\frac{\lambda^2}{2\pi} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(a_n + b_n) \quad (3)$$

$$a_n = -\frac{j_n(\rho) [n_c \rho j_n(n_c \rho)]' - j_n(n_c \rho) [j_n(\rho)]'}{h_n^{(2)}(\rho) [n_c \rho j_n(n_c \rho)]' - j_n(n_c \rho) [\rho h_n^{(2)}(\rho)]'} \quad (4)$$

$$b_n = -\frac{n_c^2 j_n(n_c \rho) [\rho j_n(\rho)]' - j_n(\rho) [n_c \rho j_n(n_c \rho)]'}{n_c^2 j_n(n_c \rho) [\rho h_n^{(2)}(\rho)]' - h_n^{(2)}(\rho) [n_c \rho j_n(n_c \rho)]'} \quad (5)$$

しかし、実際の降雨状態は伝搬区間の距離が極めて短かく、周囲の条件の良い場合には一樣性はあるが、長い距離では場所によって降雨強度が異なるのが普通である。また(1)(2)式をみても分かるように降雨による減衰は電波の通過する区間内の空間の雨滴粒径分布によって決定されるのであって、同一降雨強度であっても粒径分布が異なれば当然減衰量も違ってくる。Ryde の減衰量の基準になった $m(a)$ は、L-P が flour-method で求め

た雨滴半径を 0.125 mm 間隔で分類した雨滴を、さらに雨滴半径を 0.25 mm 間隔の区分に直した数値である。

これに対して実際の伝搬試験では Ryde の理論値と実験値とは一致しないものがあり、それは降雨の状態に「霧雨」や「普通の雨」「夕立」のような形態の違った粒径分布があるので L-P 分布のように降雨全般を平均して論ずることに原因があるという人達がいる²⁾⁴⁾。そして L-P の粒径分布よりも実際に良く説明できる分布として Joss らの実験式を取りあげている。

Joss らの実験式はつぎのようになる。

$$n(a) = N_0 \exp(-A \cdot 2a) \quad (6)$$

$$A = AR^{-B} \quad (7)$$

表 1

分 布	No	A	B
Drizzle	30,000	5.7	0.21
Wide spread	7,000	4.1	0.21
Thunderstorm	1,400	3.0	0.21

a : 雨滴半径 (mm)
 n, N_0 : ($\text{m}^{-3}\text{mm}^{-1}$)
 R : 降雨強度
 A, B : (mm^{-1})

すなわち、降雨の状態に応じて霧雨の場合は、普通の雨に比べて雨滴半径の小さいものが多くなり、夕立のような場合は普通の雨よりも粒径の大きいものが多く含まれたりするので、ミリ波の降雨減衰量も異なってくるというものである。このほかにも Marshal and Palmar (以下 M-P と記す) の実験式⁷⁾もあるが、これは L-P 分布や Joss らの「普通の雨」の分布式とはほぼ近似しているとみてよい。Joss らの式も M-P の式も L-P 分布を修正して公式化したようなものである。ただ根本的に違うのは L-P 分布の数値は正規化した式で表わすには無理な独特な分布であるのに対して、前二者は対数直線形で表わされているのが特徴である。

筆者の water blue 紙を用いた雨滴分布の測定では L-P 分布とほぼ一致した。また特定の実験式で表わすことには多小の無理があることを経験している⁶⁾。

本論文では L-P の雨滴粒径分布と Gunn and Kintzer⁹⁾ の雨滴落下速度 (一部を補間法で求めた) を用いた単位体積当りの空間粒径分布と Ryde の雨滴による減衰の数値 (一部を補間法で求めた) とを用いて、周波数 30, 48, 100 GHz について減衰量を算出した。また Joss の (6)(7) 式からも雨滴半径 0.125 mm 間隔で単位体積当りの空間粒径分布を求めて、L-P 分布と同様にして減衰量を算出した。

4. 雨滴粒径分布の違い

L-P の求めた雨滴の粒径分布は雨滴半径を 0.125 mm 間隔として、0 から 3.5 mm まで 14 区分して表わしている。降雨強度は 0.25, 1.25, 2.5, 12.5, 25, 50, 100, 150 mm/hr の 8 点について、各降雨強度の着地した降雨量が単位面積当り各区分の雨滴半径の範囲内に何%含まれるかという数値で報告している。この数値から 3 で述べた方法で単位空間体積当りの雨滴粒数を求めて減衰量の計算の元にした。この場合の粒径は雨滴区分の中心、すなわち 0-0.125 mm の場合は 0.0625 mm を基準の半径として粒数を求めている。した

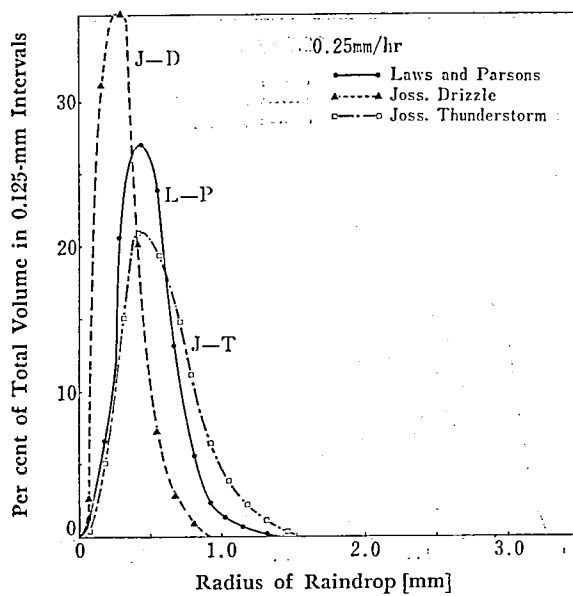


図 2 (a) 0.25 mm/hr 全降雨量に対する百分率

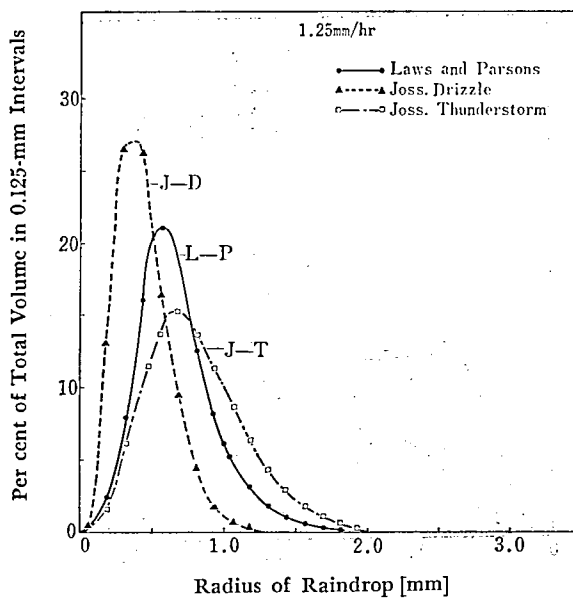


図 2 (b) 1.25 mm/hr 全降雨量に対する百分率

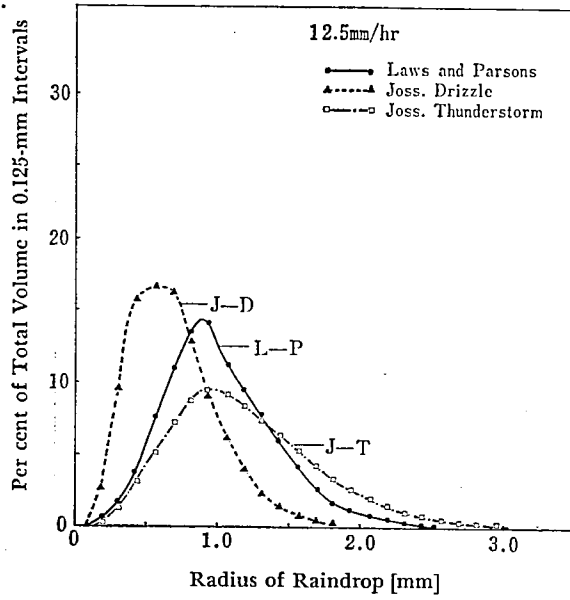


図 2 (c) 12.5 mm/hr 全降雨量に対する百分率

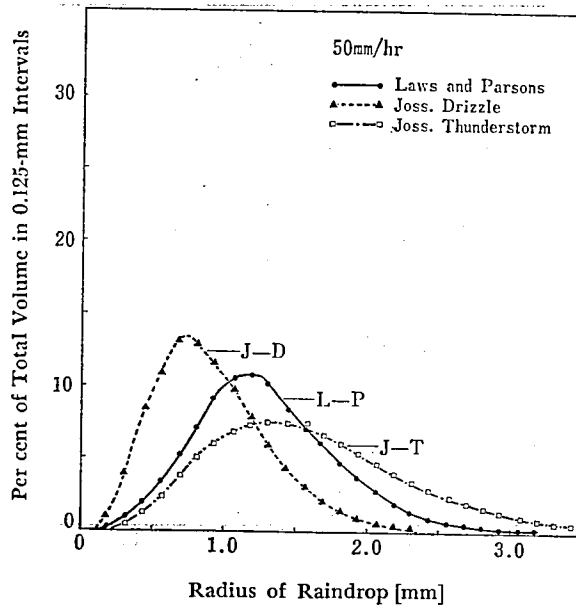


図 2 (d) 50 mm/hr 全降雨量に対する百分率

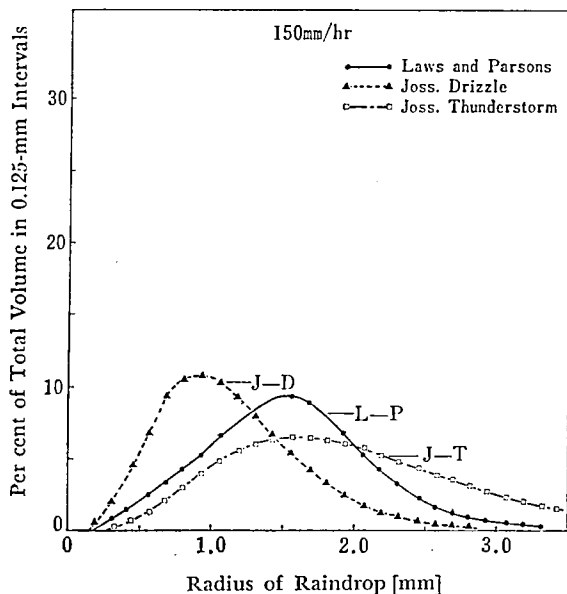


図 2 (e) 150 mm/hr 全降雨量に対する百分率

がって、Ryde の求めた雨滴の粒径や粒数とは少し異なる。また Joss の (6)(7) 式を用いて前記の L-P 分布と対応できるように雨滴の粒径および粒数の求め方は前と同一方法である。ただし、Joss の実験式は単位体積当りの空間粒数分布が求められるようになっている。

図 2 のグラフは L-P と Joss の「霧雨」と「夕立」の着地した降雨量の各雨滴区分ごとの体積百分率分布を表わしたものである。Joss の「普通の雨」や M-P の数値は L-P の数値に極めて近く、グラフが重なり合うために省略した。Joss の「霧雨」の分布のピークは L-P 分布よりも雨滴半径の小さい方にかなりずれて、数値も多くなっていることが分る。

つぎに単位体積当りの空間粒数の各雨滴区分ごとの数値を求めて表わしたのが図 3 のグラフである。これをみて分ることは 12.5 mm/hr までは最小雨滴半径 0.0625 mm の粒数は L-P 分布と Joss の「霧雨」の分布では、あまり大きな差はないことである。12.5 mm/hr 以上の降雨になると、L-P 分布には 0.125 mm までの雨滴は含まれないので、最小雨滴半径の粒数は Joss の分布とは大差がある。また L-P 分布は雨滴半径の小さい部分の曲線が凹形をしているのに対して、Joss の「霧雨」と「夕立」の分布はグラフ全体が最大粒数 $7500 \text{ 個}/\text{m}^3$ と $350 \text{ 個}/\text{m}^3$ に収斂する一本の直線で表わされているのが大きな特徴である。

L-P 分布と Joss の「霧雨」と「夕立」の分布から Ryde の雨滴減衰量（一部は補間法で求めた）を用いて、各降雨強度に対する減衰量を 30, 48, 100 GHz について求めたのが図 4 のグラフである。さらに Joss の実験式から求めた単位体積当りの空間に占める雨滴の体積と単位面積当りの着地した降雨量を L-P 分布と比較したのが表 2 である。

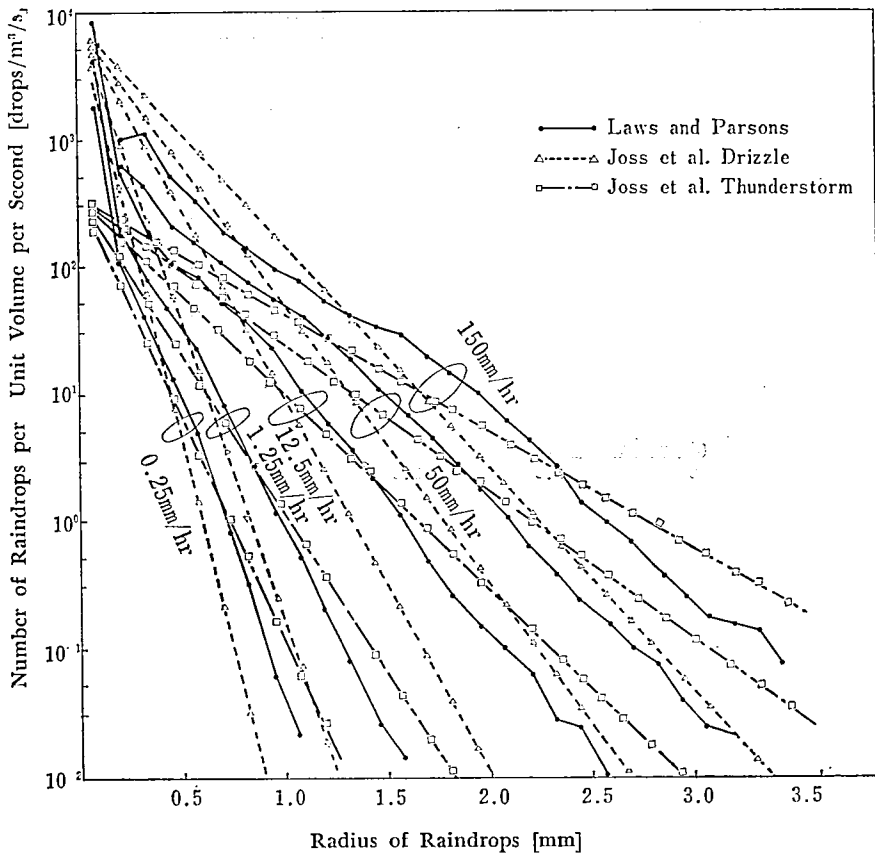


図 3 降雨強度に対する単位空間体積当りの雨滴数分布

表 2 単位面積当りの降雨量と単位空間体積当りの含水量の比較
 L-P: Laws and Parsons, J-D: Joss. Drizzle, J-T: Joss. Thunderstorm.

降雨強度 [mm/hr]	降雨量 [mm ² /m ² /s]			空間含水量 [mm ³ /m ³ /s]		
	L-P	J-D	J-T	L-P	J-D	J-T
0.25	69.44	58.13	62.51	22.31	27.72	16.89
1.25	347.2	308.6	313.2	85.34	107.4	65.43
2.5	694.4	626.9	619.0	152.2	192.4	117.1
12.5	3472	3177	2907	604.7	744.6	451.5
25	6944	6327	5567	1102	1333	806.0
50	13888	12513	10445	2061	2386	1425
100	27777	24543	19122	3911	4271	2487
150	41666	36263	26844	5730	6003	3412

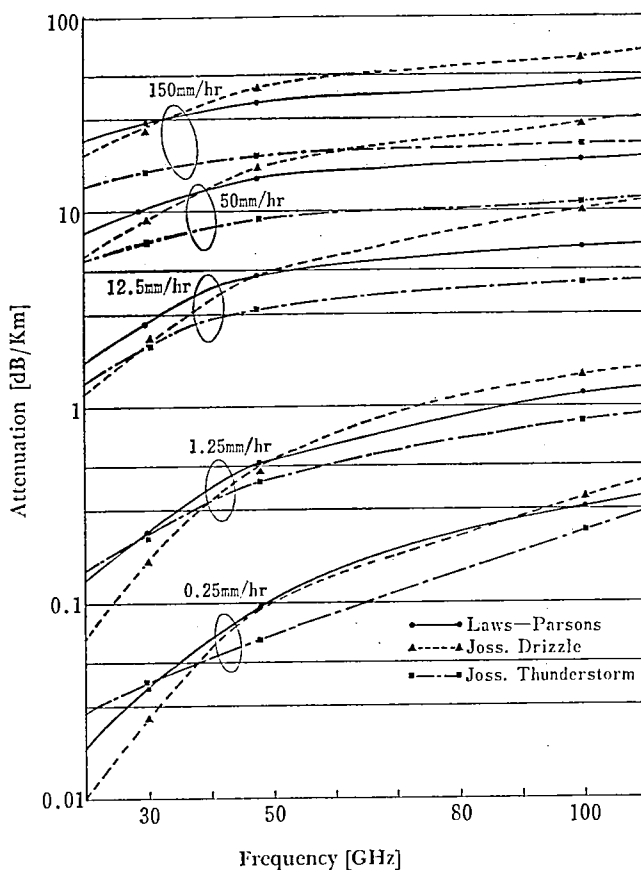


図 4 雨滴分布の違いによる減衰計算

表 3 L-P 分布に対する J-D, J-T 分布の減衰量の比

降雨強度 [mm/hr]	48 GHz		100 GHz	
	J-D/L-P	J-T/L-P	J-D/L-P	J-T/L-P
0.25	0.67	0.94	1.13	0.76
1.25	0.92	0.85	1.29	0.73
2.5	0.84	0.85	1.36	0.71
12.5	1.02	0.72	1.50	0.66
25	1.09	0.66	1.54	0.67
50	1.11	0.60	1.52	0.59
100	1.15	0.55	1.46	0.53
150	1.19	0.54	1.39	0.49

5. 実験結果

48 GHz の周波数で距離 89 m の間の伝搬試験を昭和54年 9月26日から10月7日まで、台風16号と18号の接近を中心にして、その前後で行った。図5は伝搬試験の状態をペンレ

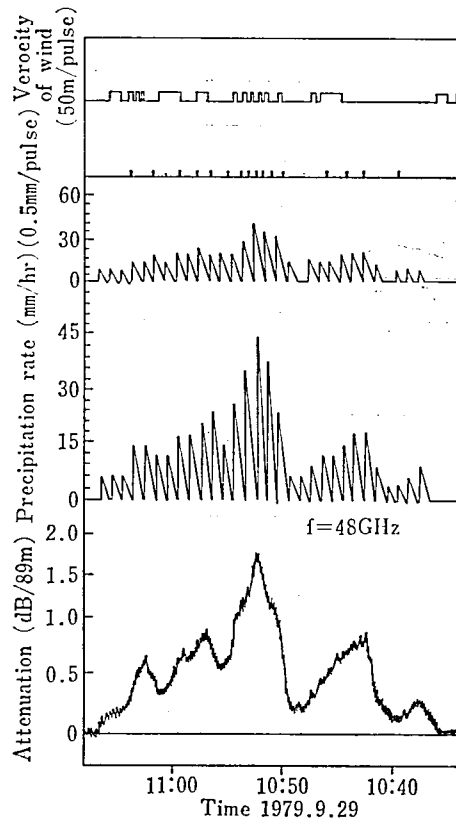


図 5 降雨強度に対する減衰の記録例

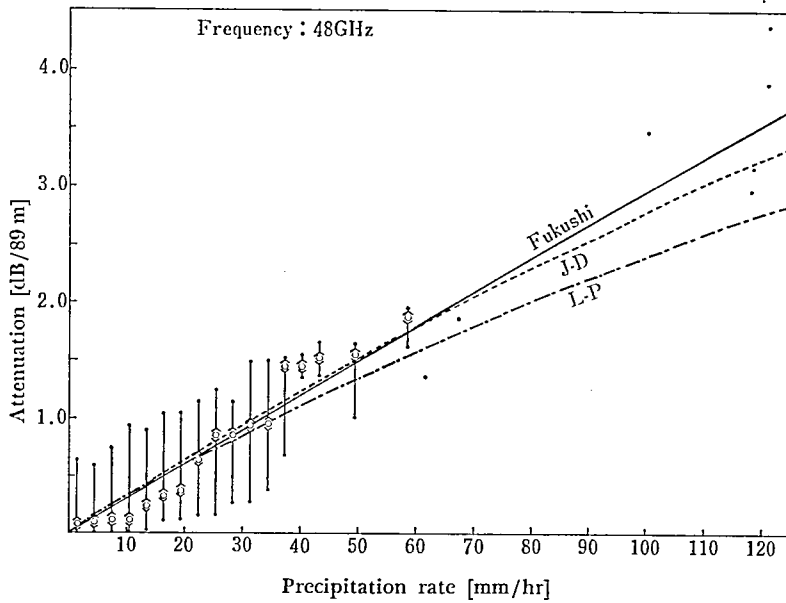


図 6 48 GHz の降雨強度に対する減衰量

コーダに記録した結果の一部を示した、電波の減衰量と3台の雨量計、風速計の同時記録の例である。降雨強度は転倒ます型雨量計の1分間の平均雨量を示している。減衰と降雨強度は大略で一致していることが分る。この間の風速は1 m/s未満であることを示している。

図6は伝搬試験の結果を集計して降雨強度に対する減衰量をプロットしたものと、L-P分布およびJossの「霧雨」の分布から計算した減衰量を併せて表わしたグラフである。—(○)—印は測定値のパラッキの範囲と平均値を示している。・印は一個の測定値を示している。

6. 検 討

Jossの実験式によると雨滴粒径分布は降雨の状態により「霧雨」と「普通の雨」「夕立」に分類されて表わされている。しかし、それぞれの雨がどれ位の降雨強度の範囲まで適用できるか明らかでない。たとえば「霧雨」の分布の場合に50-150 mm/hrの強雨にまで適用できるか疑問がある。

筆者のこれまでの実験結果によると、比較的降雨強度の小さいときは、L-P分布よりも雨滴の小さいものの分布がかなり多くなることも認められる。しかし、10 mm/hr以上の降雨になると粒径の小さい雨滴はL-P分布と同様に非常に少なくなることを経験している。したがって、Jossの「霧雨」は降雨強度の小さいとき、たとえば5-10 mm/hr以下に限られるのではないか。

Jossの「霧雨」の分布は雨滴の小さい方に分布の中心がずれているのは(図2)、小粒の雨滴は落下速度が遅く、空間に停滞している時間が比較的に長いので、表2から分るように、単位体積当りの空間含水量がL-P分布よりも多い。また着地した単位面積当りの降雨量はL-P分布よりも逆に少なくなっている。したがって、Jossの実験式に降雨量 R を入れて、計算から単位面積に着地した降雨量を求めると、実際の降雨量よりも少ないという結果がでる。しかもその数値は8-16%に達することが分る。これはJossの実験式はあまり精度のよい式とは言えない。

さらに降雨強度が少ない場合に計測に表われない小粒の雨滴が沢山含まれていて、これらの雨滴がミリ波の減衰に大きな影響を与えることが主張されている。しかし、筆者の観測ではそのような例は見受けられていない。Jossの「霧雨」の実験式の計算でもL-P分布の数値と大きな差はみられない。また別の人達¹⁰⁾によるDestrometerによる測定結果の一部をみても、測定できない小粒の雨滴が多く含まれることは予想しにくい。

Rydeの求めた減衰量の数値から、補間法により求めた数値を用いて、48 GHzの降雨減衰量をL-P分布をもとにして計算した値と今回および昭和52年に行った実験結果³⁾と、Jossの「霧雨」と「夕立」の分布をもとにして計算した値とを比べると表4になる。ただし、減衰量を求めるのに補間法を用いたり、降雨強度の大きいときの測定値が少ないなどのためグラフの読み取りに多小の誤差が入り、それ程厳正なものではない。表4から分ることはJossの「夕立」の分布を除くと、ほかは大略で一致することである。したがって、50 GHz以下の周波数では、雨滴の粒径分布の多少の違いでは、降雨強度の小さいときの減衰量の変動は一般に言われているようには大きくならない。

降雨強度が2-3 mm/hrのときの減衰量はL-P分布とJossの「霧雨」の分布のいずれも48 GHzではほぼ同一結果になる。また100 GHz位でもJossの「霧雨」が僅かに

表 4 降雨減衰の実験式と分布式との比較

ATT (48 GHz) = aR^b [db/km]		
実験と分布	a	b
今回の実験	0.346	0.990
52年の実験	0.398	0.996
L-P 分布	0.395	0.922
J-D 分布	0.324	1.004
J-T 分布	0.349	0.831

多くなる位であり差はない(図4)。したがって、50 GHz 帯の降雨による減衰は降雨量の少ないとき、理論値と実験値とは合わないということはない。

Joss の「霧雨」の分布を用いて 100 GHz での減衰量の計算結果をみると(図4)、確かに L-P 分布から求めた減衰量よりも大きく、降雨強度が 50 mm/hr を超えると、その差は 10 dB となり、150 mm/hr では 18 dB とかなり大きくなるのが分る。しかし、1.25 mm/hr で約2倍ということも報告されているが、筆者の計算では 0.3 dB (30%) 多くなる位である。また 50-150 mm/hr の大雨での「霧雨」ということはありうるかどうか甚だ疑問がある。

7. むすび

Joss の「霧雨」の分布は降雨強度が小さいときは L-P 分布と大差はない。また 50 mm/hr 以上では Joss の「霧雨」は実際の降雨状態を表わしているとはいえない。

Joss の「霧雨」の分布で求めた減衰量は 1.25 mm/hr で 100 GHz のとき、L-P 分布の減衰量の 1.5 倍以下である。

降雨強度の小さい場合の減衰量は雨滴粒径分布の多少の違いでは変らない。分布の違いによる影響は 100 GHz 以上の周波数で、しかも 50 mm/hr 以上の降雨強度の場合である。したがって、この場合の伝搬試験を数多く行う必要がある。また L-P 分布では表われない微小雨滴の存在は Joss の「霧雨」の分布や 48 GHz の伝搬試験の結果からも予想できない。

48 GHz の伝搬試験から降雨強度が大きくなると Joss や L-P 分布よりも減衰量が多小大きくなる傾向が認められる。これは粒径の大きな雨滴が多くなり、複数個の接近または二重散乱などの影響も考えられる。

謝 辞

最後に本研究の機会を与えて下さった本学竹谷教授や常に御指導を賜わる明大築地教授、いつも助言と励ましをして下さる東海大森屋助教授に深謝の意を表します。また実験場所を考慮して下さった管理営繕課荒見聖也氏、データ整理などを手伝ってくれた卒研生の高柳育生君その他の学生にも記して謝意を表します。

文 献

1. J. A. Laws and D. A. Parsons: "The relation of raindrop-size to intensity", Trans. Amer. geophys. Union, Vol. 24, part II, p. 452, (1943).
2. 鵜飼, 島田: "50 GHz 帯の降雨減衰特性", 信学論 B, Vol. 56-B, No. 10, p.439, (昭 48-10).
3. 福士清造: "ミリ波の雨滴粒径分布による減衰特性", 明星大学研究紀要理工学部, Vol. 15, p. 163, (昭 54-2).
4. 岡村, 國原: "140 GHz 帯における降雨による大気減衰について", 信学論 B, Vol. J60-B, No. 4, p. 267, (Apl. 1977).
5. J. Joss, T. C. Thamas and A. Waldvogel: "The variation of raindrop-size distribution at Locarno", Proc. Intern. Conf. Cloud phys., Tronto, Canada, p. 369, (Aug. 1968).
6. D. E. Kerr: "Propagation of short radio wave", Radiation Lab. Series, Vol. 13, Section 8.6, (1951).
7. J. S. Marshall and W. Mck. Palmer: "The distribution of raindrops with size", J. Meteor., Vol. 5, p. 165, (1948).
8. 福士清造: "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, Vol. 12, p. 77, (昭 51-1).
9. 藤原美幸: "レーダ気象のための雲物理学", 気象研究ノート, Vol. 90, p. 228, (1967).
10. 古浜洋治他: "ミリ波帯電波伝搬実験速報", 電波研究所研究発表会, 第 57 回予稿, p. 55, (昭 54-11).

以上

受理 55.5.26