

短距離伝搬路での降雨によるミリ波の減衰

福 士 清 造*

Millimeter Wave Attenuation by Rain on A Short Path of Propagation

by Seizo FUKUSHI

Radio attenuation by rain was investigated on a short path of propagation of 87.5m using a frequency of 35 GHz. The rainfall rate was measured by means of the bucket-type rain gauge having an accuracy of 0.05mm/hr for one pluse and set midway on the path of propagation experimental results reveal that the radio attenuation and the rainfall intensity are in a fairly good accord and support the Ryde and Ryde theory of radio attenuation by rain if the rainfall measurement is of a sufficient accuracy.

1. まえがき

雨による電波の減衰の問題は Ryde and Ryde の理論の発表以来¹⁾, 多くの人達によって電波と気象の両面から研究され, 受信電界強度と降雨量の同時観測結果も数多く報告されている。しかし, これらの実測結果によると, 雨による電波の減衰は一般に Ryde and Ryde の理論値よりも大きく²⁾³⁾, 時として1.7倍から3倍にもおよぶことがあるため, Ryde and Ryde の理論の基礎となっている Laws and Parsons の雨滴粒度分布に疑問があるとする説もある⁴⁾。しかし筆者は, 理論と実験のこのような相違は Laws and Parsons の粒度分布によるのではなく, 雨量測定および伝搬試験の方法に問題があるとするので⁵⁾, さきに雨滴の粒度分布をできるだけ正確に測定することを試み, Laws and Parsons の分布と良く一致する結果を得た⁶⁾。したがって, 降雨量と降雨による電波の減衰を同時に測定して Ryde and Ryde の理論値に一致する結果が得られれば筆者の主張は裏づけられることになる。

ところで, 降雨強度を測定する場合には, 伝搬路全体にわたって一様とみられるような降雨につき, その強度を瞬間値に近い値で測定することが必要である。しかし, 従来の伝搬試験は比較的大きな距離で行なわれ, 伝搬通路上の全体の降雨強度を求めると, 数カ

* 理工学部電気工学科講師 電波工学

所に、しかも感度のあまり良くない雨量計を置いて測定していたため、得られた雨量の測定結果は必ずしも Ryde and Ryde の理論を適用できるものではなかった。

そこでこのような事実を考慮に入れ、降雨が一様とみられる程度の短距離区間 (87.5 m) で 35GHz のミリ波の伝搬試験を行ない。同時に 1 分間隔の平均強度を測定できる転倒ます型雨量計を用いて降雨強度を瞬間値に近い値で測定した。また降雨域内を通過する電波の減衰量の測定については、条件を単純化して不明な要素をできるかぎり除外するため、比較的降雨量が多く、風があまり強くない場所と時期を選んだ。電波の周波数としては十分安定に作動する送受信装置が得られること、90mの短距離伝搬路でも降雨による電波の減衰が測定できることを考慮して 35GHz を選定した。

2. 降雨による減衰

電波が大気中を伝搬する場合、伝搬通路に降雨があれば、それによって電波は減衰を受ける。これは電波のエネルギーの一部が水滴に吸収されて熱損失となることのほか、電波が散乱されて受信点に到達しないことによるものである。通常、前者は吸収断面積、後者は散乱断面積を用いて表わされる。これらを併せて減衰の全損失断面積 $Q(a, \lambda)$ とすると、電波の伝搬方向から失われるエネルギー W は

$$W = SQ(a, \lambda) \quad (1)$$

で与えられる。ここで S は Poynting vector の大きさ、 $Q(a, \lambda)$ は半径 a の雨滴の波長 λ に対する全損失断面積である。

したがって、一様な強度で降っている雨の中を電波が dl だけ進むときのエネルギーの減少は半径 a の雨滴の単位体積あたりの粒数を $n(a)$ として

$$-dS = S dl \int_0^\infty n(a) \cdot Q(a, \lambda) da \quad (2)$$

となる。(2)式を積分すると電波が降雨域中を伝搬したことによるエネルギーの減少量を表わす式が得られる。すなわち、

$$S = S_0 e^{-\int \alpha da} \quad (3)$$

$$\alpha = \int_0^\infty n(a) \cdot Q(a, \lambda) da \quad (4)$$

となる。

落下する雨滴は半径が大きいき偏平な回転楕円形となることはよく知られている⁷⁾が、減衰量については、雨滴が偏平な回転楕円体であるとして計算しても球形近似の場合に比べて極めてわずかの誤差しか生じない⁶⁾。したがってここでは球形として取扱うことにする。

一方、半径 a の一箇の雨滴の全損失断面積 $Q(a, \lambda)$ はつぎの式で与えられる。

$$Q(a, \lambda) = \frac{\lambda^2}{2\pi} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(a_n + b_n) \quad (5)$$

ここで a_n , b_n は係数であるが詳しくは文献(9)も参照されたい。雨滴の粒度分布 $n(a)$ を伝搬路上の空間内で直接測定することはできないが、着地した雨滴の粒度分布 $m(a)$ は water blue 法やその他の方法で求めることが可能である。しかし、着地粒度分布 $m(a)$ と空間粒度分布 $n(a)$ との間には

$$m(a)da = \frac{15.1n(a)v(a)da}{P} \quad (6)$$

の関係があるので、 $m(a)$ がわかればその降雨のときの粒度分布 $n(a)$ を求めることができる。ここで $v(a)$ は半径 a の雨滴の終末速度 [m/s]、 P は降雨強度 [mm/hr] である。

ところで、雨滴の空間粒度分布は降雨によって異なるので、 $n(a)$ と雨滴の体積との関係がわかっていなければならない。これは多くの人達⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾により求められていて、

$$1 - F = \exp\left[-\left(\frac{2a}{x}\right)^\alpha\right] \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= AR^P \\ n &= AR^\beta \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

から算出される。ここで F は a より小さい半径の雨滴の全体積が全雨滴の水の量に占める割合を表わし、 R は降雨強度 [mm/hr]、 A 、 P 、 α 、 β は定数である。

電波の伝搬区間内において、雨が同一強度で降っていると仮定すれば 1 km あたりの雨による減衰量 L はデシベル値で表わして

$$L = 4.343 \times 10^3 \int_0^\infty n(a)Q(a, \lambda)da \quad [\text{dB/km}] \quad (9)$$

となる。したがって、雨による減衰量は、降雨強度ではなく、伝搬通路に存在する雨滴の空間粒度分布によって決定されることになるが、もちろん(6)(7)式の関係があるので、空間粒度分布と降雨強度のいずれかがわかっていれば降雨による減衰量を推定することができる。

3. 伝搬試験および雨量測定の方法と装置

雨が短期間に集中してかなり多量に降ること、しかもあまり強い風が吹かないことを考慮して、伝搬試験および雨量測定実施の場所を、静岡県大井川沿いにある東海大学中川根研修所(旧藤川小学校)の校庭に選んだ。この地方は降雨量の多いところで、中川根町立中央小学校の気象班が観測した過去10年間のデータ⁽¹²⁾によると、年によって変化はあるが、5月から10月にかけて月間200ミリから1000ミリを超える降雨がある。また中川根研修所は山あいであって風が少ないので研修所の校庭に87.5mの距離をとって送受信装置を設置した。87.5mの距離は全伝搬路にわたって降雨強度が一様とみられる程度に短区間であること、しかし一方、雨による電波の減衰が十分な精度で測定できることを条件として決定したものである。

減衰量の測定に用いた送受信装置は図1に示す通りである。まず送信機は、筐体の中に35GHz ガン発振器(出力約12mW)、直流定電圧電源、アイソレータおよび減衰器を入れたもので、これを高さ1.8mの木製の台上に固定した。送信アンテナには直径60cmの円形パラボラ(利得約40dB)を用いた。受信機は筐体の中に減衰器とクリスタル・マウント(ダイオードIN53)を入れたもので、高さ1.7mの鉄製Lアングルの台の上に木板を敷いて、その上に固定した。アンテナは送信用と同じものを採用し、送信用、受信用ともに雨滴が付着しないようにベニヤ板の覆いを取付けてある。クリスタル・マウントの直流出力は3C2Vの同軸ケーブル(約30m)で校舎に導き、室内に置いた電子式検流計に入れて増幅した後、記録計によってレベルを記録させた。降雨強度計としては瞬間強度を測

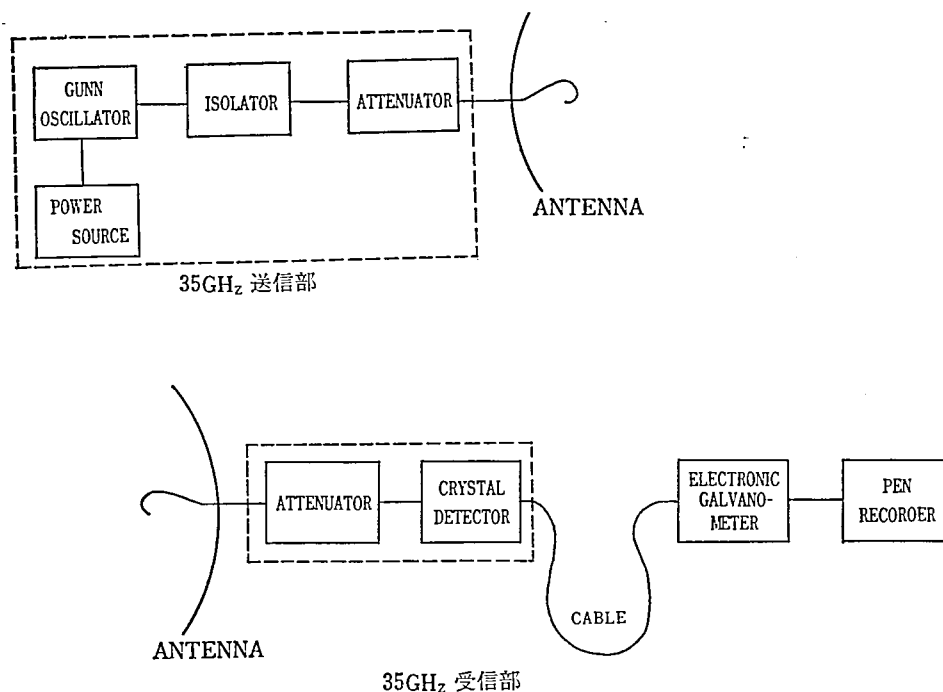


図1 送受信装置構成

定できるものが望ましいが、現状ではまだ満足すべき測定器が得られないので、気象庁検定済の1パルス0.5mm/hrの転倒ます型雨量計に塩化ビニール製の拡大漏斗を取付け、1パルス0.05mm/hrに感度を上げたものを用いることにした。この雨量計にパルス数に応じて電圧が1分間隔で階段状に上昇して出力側に出るようなタイマー回路を取付け、1分間の平均降雨強度を記録できるようにした。

なお、この雨量計は送受信機間のほぼ中央の位置に、地表面から受水開口面までの高さが90cmになるように設置した。

4. 観測結果とその考察

観測を行ったのは昭和50年7月3日から10月17日までの約4ヶ月の間に、台風が接近したときと大雨予報が出た時とであるが、この報告はそのうちの台風5号が東海地方に上陸すると予想された8月16日から18日にかけて自記記録によって得られたデータに関するものである。台風5号は、結局、九州に上陸したので試験場の藤川は台風の直接の影響は受けなかった。しかし8月16日14:00から翌17日12:00までの間に台風の刺激により10分ないし30分の間隔で断続的にかなり強い降雨があった。降雨は20時間の間に約40回ほど断続しており、これから延時間にして約10時間分のデータを得ることができた、このときの降雨強度と電波減衰量の記録の一部を図2に示してある。

降雨強度と減衰量のパターンは全体としてはかなり良く一致しているが、細かくみれば、対応してないところもある。これは瞬時降雨強度でなく1分間の平均強度しか測定できないこと、また場所の違いによる降雨の不均一がまったくないわけではないことによるものと考えられる。

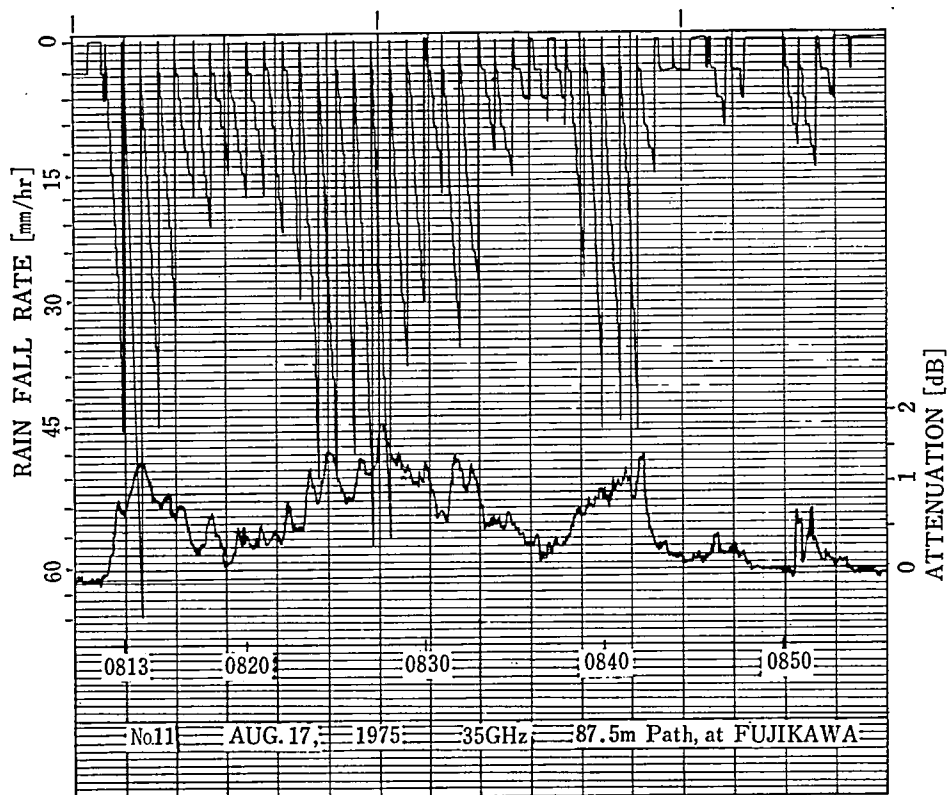


図2 降雨強度と減衰量の実測例

降雨による減衰は、図2にみられるように、時間とともに連続的に変化するので、減衰量を降雨強度の記録と対比するためには減衰量を数値化することが必要である。そこで記録紙上で減衰量を1分間隔に区切り、最高値と最低値の平均をもってその区間での減衰量とした。図3はこのようにして求めた電波減衰量と降雨強度との関係である。図の実線は実測減衰量の平均値、点線は浅利¹³⁾が Ryde and Ryde の理論式から計算して得られた結果であるが、直ちに認められるように、実測の平均値と理論値とは5%程度の違いでほぼ一致している。なお、雨滴の空間粒度分布については、さきに行なった筆者ら⁶⁾¹¹⁾の研究により、Laws and Parsons 分布の正しいことがわかっているのでこれを採用した。

5. むすび

風のないとき降雨強度がほぼ一様とみなせる程度に短距離の区間を選び、周波数35GHzの電波の降雨時における伝搬試験を行ない。一方、降雨強度を瞬時値に近い1パルス0.05ミリの精度で1分間隔の平均値として測定した。この方法で得られた電波の減衰量と降雨強度の記録を分析したところ、Ryde and Ryde の理論値と実測値とかなり良く一致すること、したがって降雨に関する測定の精度が良ければ Ryde and Ryde の理論式は正確に成り立つものと結論される。

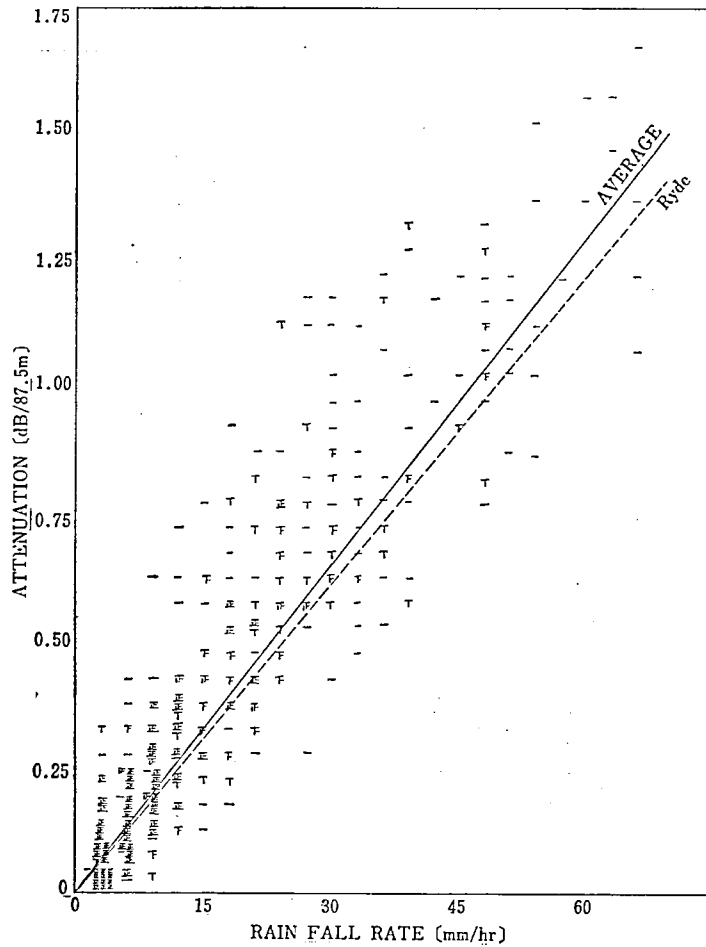


図3 降雨強度に対する減衰量

6. 謝 辞

本研究は東海大学森屋助教授と協同して行ったものの一部を筆者がまとめたものである。本研究の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の意を表します。また東海大学中川根研修所の管理人榊原正行氏一家には特別にお世話になり、そのために順調に実験が遂行できたことを記して謝意を表します。

参考文献

- 1) J.W. Ryde, D. Ryde, "Attenuation of centimeter and millimeter waves by rain, hail, fog and clouds," GEC Report, No. 8670, May 1945.
- 2) K. Funakawa, J. Kato, "Experiment studies of propagation characters of 8.6mm waves on the 24km path," Journal of the radio research Lab. Vol. 9, No. 45, Sept. 1962.
- 3) R.G. Medhurst, "Rainfall attenuation of centimeter: comparison of theory and measurement." IEEE. Trans. AP-13, p. 550, 1962.

- 4) 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”, 信学会アンテナ伝播研究会資料, AP 70-21, June 1970.
- 5) 福士清造, “降雨による電波の減衰と降雨強度”, 明星大学研究紀要, 理工学部 No. 8, March 1973.
- 6) 福士清造, “沍紙法による雨滴分布の測定”, 明星大学研究紀要, 理工学部 No. 12, Jan 1976.
- 7) D.C. Blanchard, “The behavior of water drops at terminal velocity in air,” Trans. American Geophysical Union, Vol. 31, p. 836, 1950.
- 8) 小口知宏, “降雨による電磁波の減衰の偏波面による違い”, 信学会誌, Vol. 45, No. 2, p. 137, Feb. 1962.
- 9) D.E. Kerr, “Propagation of short radio waves,” p. 671, 1956, Mc Grow Hill.
- 10) J.O. Laws, D.A. Parsons, “The relation of raindrop-size to intensity,” Trans. American Geophysical Union, Vol. 24, p. 452, 1943.
- 11) A.C. Best, “The size distribution of raindrops,” Quarterly Journal Royal Meteorology Society, Vol. 76, p. 16, 1950.
- 12) 中川根町立中央小学校, 気象班 “気象観測概要”, 昭和39—49年
- 13) 浅利英吉, “球状誘電体の散乱断面積の計算について”, 信学論B, Vol. 52—B, No. 4, April. 1969.

(昭和50年9月3日受理)