

降雨による電波の減衰と降雨強度 II

福 士 清 造

1. は し が き

降雨による電波の減衰を考える場合、従来の多くの報告では通常の気象観測用雨量計で測定した降雨強度の値を用い、それと減衰量との関係を問題にしている。降雨による電波の減衰については、電波の通路上の空間に存在する雨滴の大きさとその個数の分布、すなわち粒度分布が一つの重要な要素であり、これに関して多くの研究が行なわれ、いろいろな報告が出されている。

上智大の鶴飼等⁽¹⁾はわが国における降雨の雨滴粒度分布が Ryde⁽²⁾ の計算値の基礎になっている Laws & Parsons⁽³⁾ の分布とは異なるとし、わが国の雨滴の粒度分布は含水量の百分率分布で表わしたときの最大分布値が Laws & Parsons の分布曲線に比べて、雨滴半径の大きな方にずれたガウス分布になるとしている。そして、実際の伝播試験の測定結果から、とくに小雨のときに、実測の減衰量が Ryde の降雨強度対減衰曲線よりも大きな値になるとしている。

また北海道大の西辻等⁽⁴⁾⁽⁵⁾は、同一降雨強度の雨でも、季節等により雨滴の粒度分布に大きな変化があり、Laws & Parsons の分布はこれらの粒度分布の変化の平均値に相当する分布を表わしているに過ぎないこと、したがってこの分布だけでは降雨による電波の減衰を説明できないとし、雨滴の粒度分布として $n_r = A \cdot 10^{-Br}$ の形を採用すれば、B の値の変動範囲を知ることにより、降雨による電波の減衰量が説明できると述べている。

筆者は以前から降雨による電波の減衰は瞬間降雨強度できまることが、したがってそれが実測できれば Ryde の減衰曲線と一致する結果が得られることを主張して来た。そこで他の研究グループの報告のように、雨滴の粒度分布がはたしてガウス分布になっているか、また同一降雨強度のときの粒度分布の変化の有無、季節による粒度分布の変化を調べ、その結果から電波の減衰量が同一降雨強度でも、その時々によって、また季節によって変動するか否か、もし変動するとすればどの程度のものであるかについて調べてみた。

結果はいずれも否定的であり、(i)雨滴の粒度分布はガウス分布にはならない、(ii)同一降雨強度では雨滴の粒度分布はほぼ一定で、電波の減衰に変動を与えることはない、(iii)また季節により粒度分布は多少変るが電波の減衰量に大きな変動を与えるほどの変化は認められないことを見出した。さらに water blue 法の測定と並行して転倒ます型雨量計による測定を行ない、water blue 法の瞬間降雨強度と転倒ます型雨量計による降雨強度との関係を求めたところ、転倒ます型雨量計の降雨強度に約 1.6 を乗ずれば瞬間降雨強度に相当する値が得られることがわかった。したがって従来の雨量計による降雨強度でも、これを瞬間降雨強度に換算すれば従来の伝播試験の実測結果を説明することができる。

2. 降雨による電波の減衰

伝播通路上に降雨域がある場合、電波の減衰は雨滴の吸収による熱損失と、散乱によるエネルギー損失の両者に基づくので、これらを併せた全損失断面積を考えることにする。⁽⁶⁾ 雨滴の空間粒度分布 $n(a)$ を直接に測定する方法は未だ見出されていないが、降雨量に対する着地粒度分布 $m(a)$ は water blue 法により求めることができるので間接的に $n(a)$ を知ることができる。つまり

$$m(a)da = \frac{n(a) \frac{4\pi a^3}{3} v(a) da}{\int_0^{\infty} n(a) \frac{4\pi a^3}{3} v(a) da} = \frac{15.1 n(a) v(a) da}{P} \quad (1)$$

の関係があるので、 $n(a)$ は次の式から求めることができる。

$$n(a) = \frac{m(a) P}{15.1 v(a)} \quad (2)$$

そこで $v(a)$ は半径 a の雨滴の終末速度 [m/s]、 P は降雨量である。

ゆえに、電波の減衰量 L は、降雨が同一強度で、ある区間に一様に降っているとすれば、上の $n(a)$ を用いて

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

となる、ここで Q は半径 a の雨滴による波長 λ の電波の全損失断面積である。電波の減衰量は、(3)式から明らかのように、降雨量や降雨強度でなく、雨滴の空間粒度分布 $n(a)$ によって決定される。しかし、雨滴の空間粒度分布と降雨強度との間に一定の関係があれば、降雨強度を求めることにより減衰量を計算することが可能である。また降雨強度は瞬時的に変化する性質のものであるから、これを正しく測定することは困難であるが、water blue 法を用いれば比較的容易に測定することができる(ただし、断続的測定法なので集計がやっかいである)。なお、電波の減衰は雨滴の形状によっても変化するが、形状が回転楕円体とみられる雨滴の数は、小雨の場合、球形のものに比べてきわめて少なく、すべてが球形であるとしても誤差はそれ程大きくない。雨滴が回転楕円体であるときと球形であるときの偏波面の違いによる電波の減衰量の差異については小口の報告があるが、降雨強度 10mm/hr 以下の雨では測定誤差程度の差異しか生じないことが知られているので、ここではこの問題には触れない。

3. 粒度分布と降雨強度の測定

雨滴の粒度分布と降雨強度の測定には、費用がかからないこと、測定が簡単であることから今回も water blue 法を用いた。測定紙の製作や測定方法等については前回の報告⁽⁶⁾ に述べてあるので省略する。water blue 法による測定と同時に、受水口径 44.7cm、0.1 mm/pulse の転倒ます型雨量計による雨量測定を併せ行ない、この雨量計のパルス間隔の時間を記録計により測定した。測定した降雨強度の範囲はおよそ 0.2mm/hr から 13mm/hr までで、Laws & Parsons のデータとの比較のため 0.25, 1.25, 2.5, 12.5mm/hr に区分した。また雨滴半径は 0.01cm、0.025cm 以上 0.025cm 間隔で分類してある。

直径 18.5cm の円形 water blue 紙では、降雨強度が弱い場合は、半径の大きな雨滴の補

捉率が悪くなり、測定した結果は実際よりもやや低くなるようである。また降雨強度が強い場合は、water blue 紙の同一箇所に数個の雨滴が重なる、雨滴がはねて飛び去る等のため、大きな雨滴の痕跡が実際よりも小さくなる、また小さい雨滴としぶきの破片の区別がつかなくなる、などのため精度が低下するものと思われる。

4. 雨滴の粒度分布

water blue 法による降雨の測定は昭和46年10月より昭和47年11月までの間に明星大学の構内において行なった。図1は water blue 法による降雨強度と季節別の雨滴の着地粒度分布（体積百分率分布）の測定値および Laws & Parsons の粒度分布（点線）である。図から明らかのように、同一降雨強度でも夏期には雨滴の半径の大きいものも多く、秋期には小さいものが多い。降雨強度0.25mm/hr では春期と冬期には秋期に比べ雨滴半径の小さい雨が多く降っている、その他の降雨強度についてはデータのない春期を除けば、冬期の降雨は秋期の降雨よりも雨滴の半径が大きいようである。ただ冬期のデータは

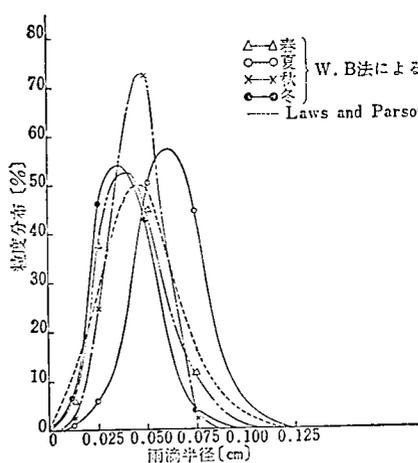


図1. (a) 雨滴粒度分布
0.25mm/hr

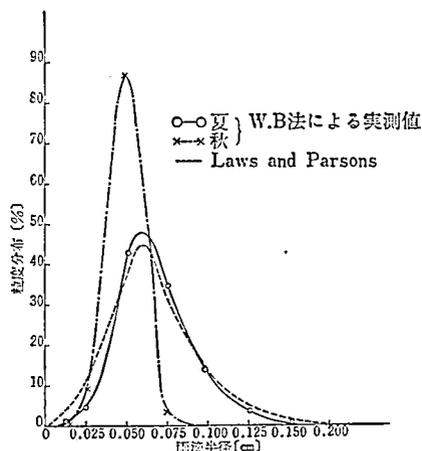


図1. (b) 雨滴粒度分布
1.25mm/hr

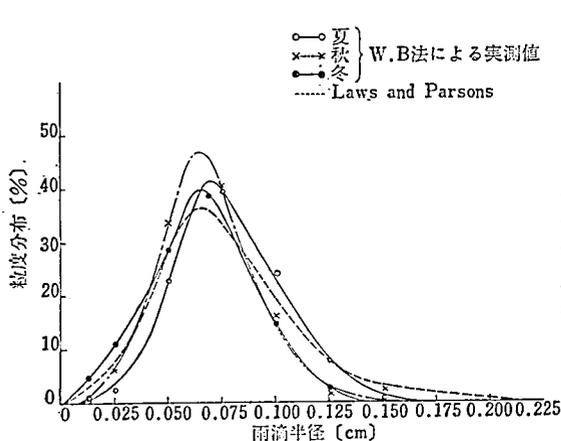


図1. (c) 雨滴粒度分布
2.5mm/hr

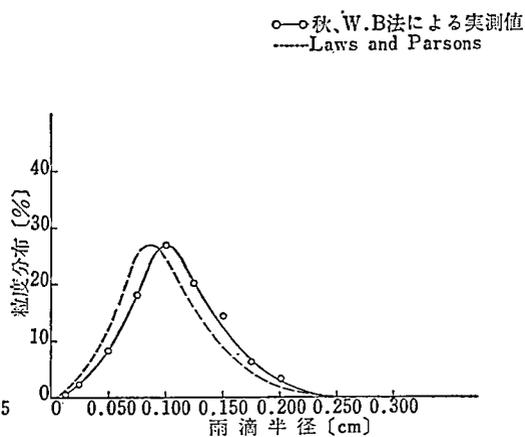


図1. (d) 雨滴粒度分布
12.5mm/hr

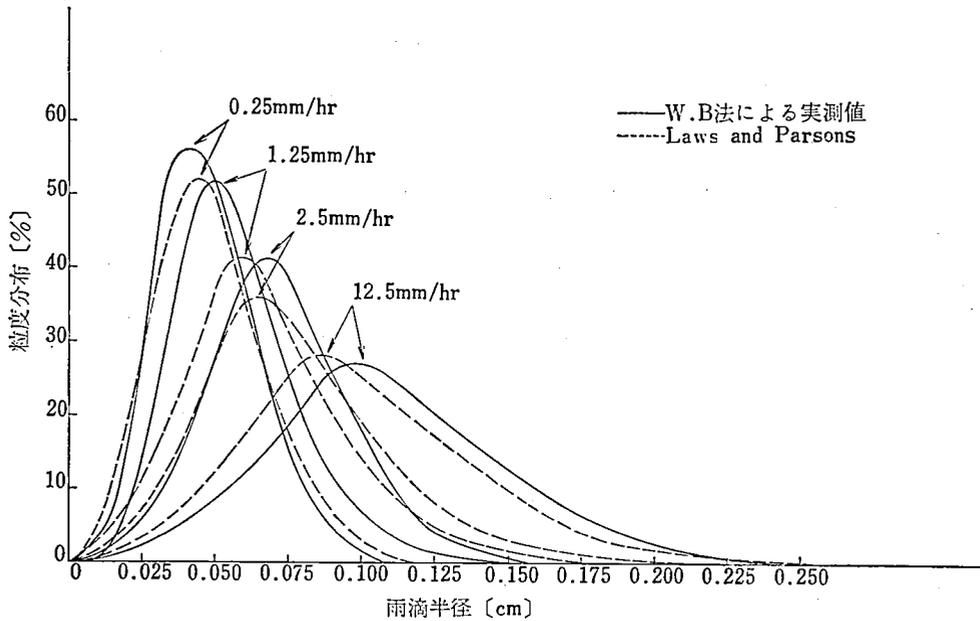


図2. 雨滴粒度分布

降雨強度をパラメータにした平均分布値

測定数が少ないので、確かなことはいえない。

図2の実線は粒度分布を季節に関係なく、年間を通して平均した降雨強度をパラメータとして表わしたもので、点線は比較のために記入した Laws & Parsons の粒度分布曲線である。図から明らかなように粒度分布は最大値が雨滴半径の小さい方に偏った非対称形で鵜飼等のいうガウス分布にはなっていない。また最大値も筆者の測定値と Laws & Parsons の値とでは位置がずれている。降雨強度の小さいときは前者は後者よりも雨滴半径の小さい方に、降雨強度が強いときは雨滴半径の大きい方にずれた形になっているが、全体としての傾向はいずれもほぼ同じである。従って小雨のときに減衰量が Ryde の曲線よりも大きくなることはないはずである。小雨のときに減衰量が Ryde の曲線よりも大きくなることについては7で述べる。

5. 雨滴の空間数密度

雨滴の粒度分布については、同一の大きさの雨滴が降ったと考えられるような観測結果の報告と、同一降雨強度でも半径の小さい雨滴が多く含まれる場合および大きい雨滴が多く含まれる場合があるとする報告がある。筆者のこれまでの測定結果では、同一の大きさの雨滴が降った雨の大半を占めるような例は全く見あたらない。また同一の降雨強度について、半径の小さい雨滴が多く含まれる場合と、半径の大きい雨滴が多く含まれる場合の両者があることは事実であるが粒度分布が Laws & Parsons の分布からそれ程大きくはずれることはないようである。(図1) 降雨強度が強くなっても半径の小さい雨滴はいぜん存在して、粒数からみれば、いかなる降雨強度の場合にも半径の小さい雨滴の数が多くなって

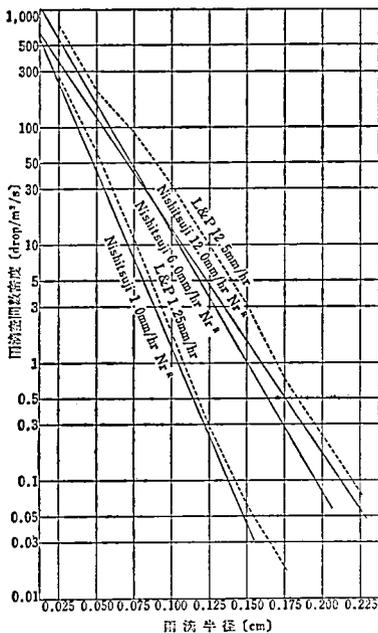


図3. 降雨強度をパラメータにした雨滴空間数密度 L&PとNishitsujiとの比較

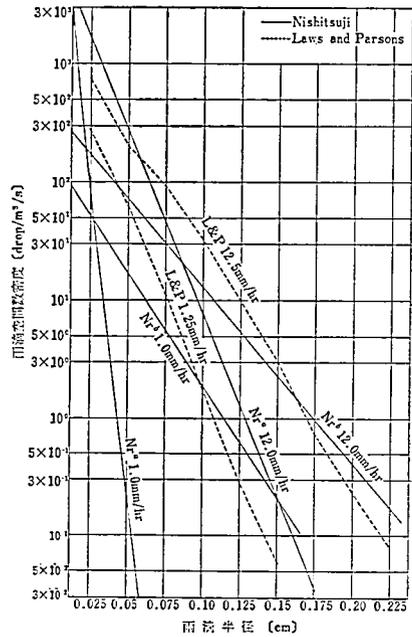


図4. 雨滴半径に対する雨滴空間数密度
Nr¹: 半径の小さい雨滴の場合
Nr²: 半径の大きい雨滴の場合

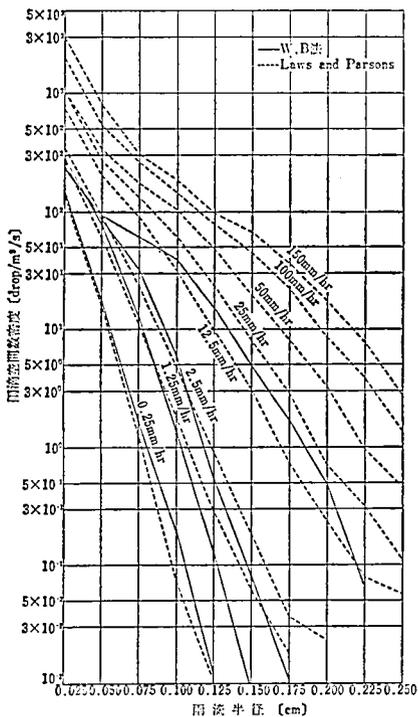


図5. 降雨強度をパラメータにした雨滴空間数密度曲線 Water blue法による算出値と Laws and Parsonsとの比較

いる。雨滴の空間粒数密度は、雨滴半径に対する降雨強度を横軸にとると、セミログ図では直線的に変化すると報告されている。(4) しかし、筆者の water blue 法による測定値からはこのような直線関係は見出されない。比較のため water blue 法から求めた値、Laws & Parsons の値および西辻等の値をセミログ図にプロットしてみると図3~5のようになる。図3は粒度分布の平均値に関する西辻と Laws & Parsons の値を比較したもので、西辻等は Laws & Parsons の結果と良く一致すると述べているが、両者の降雨強度は同一でないものの比較になっていることに注意せねばならない。しかし降雨強度 12mm/hr の直線は Laws & Parsons の6mm/hr の直線とほぼ同じ値を示している、この降雨強度を Laws & Parsons の空間の雨滴含水量から計算してみると 5.8mm/hr、すなわち、Laws & Parsons の値の半分以下の降雨強度にしかならない。図4は、西辻等によると、同一降雨強度でも粒度分布は場合により異なることを示したもので、雨滴空間数密度を小さい雨滴が多く含まれる場合(Nr^a)、と大きい雨滴が多く含まれる場合(Nr^b)とに分け、Laws &

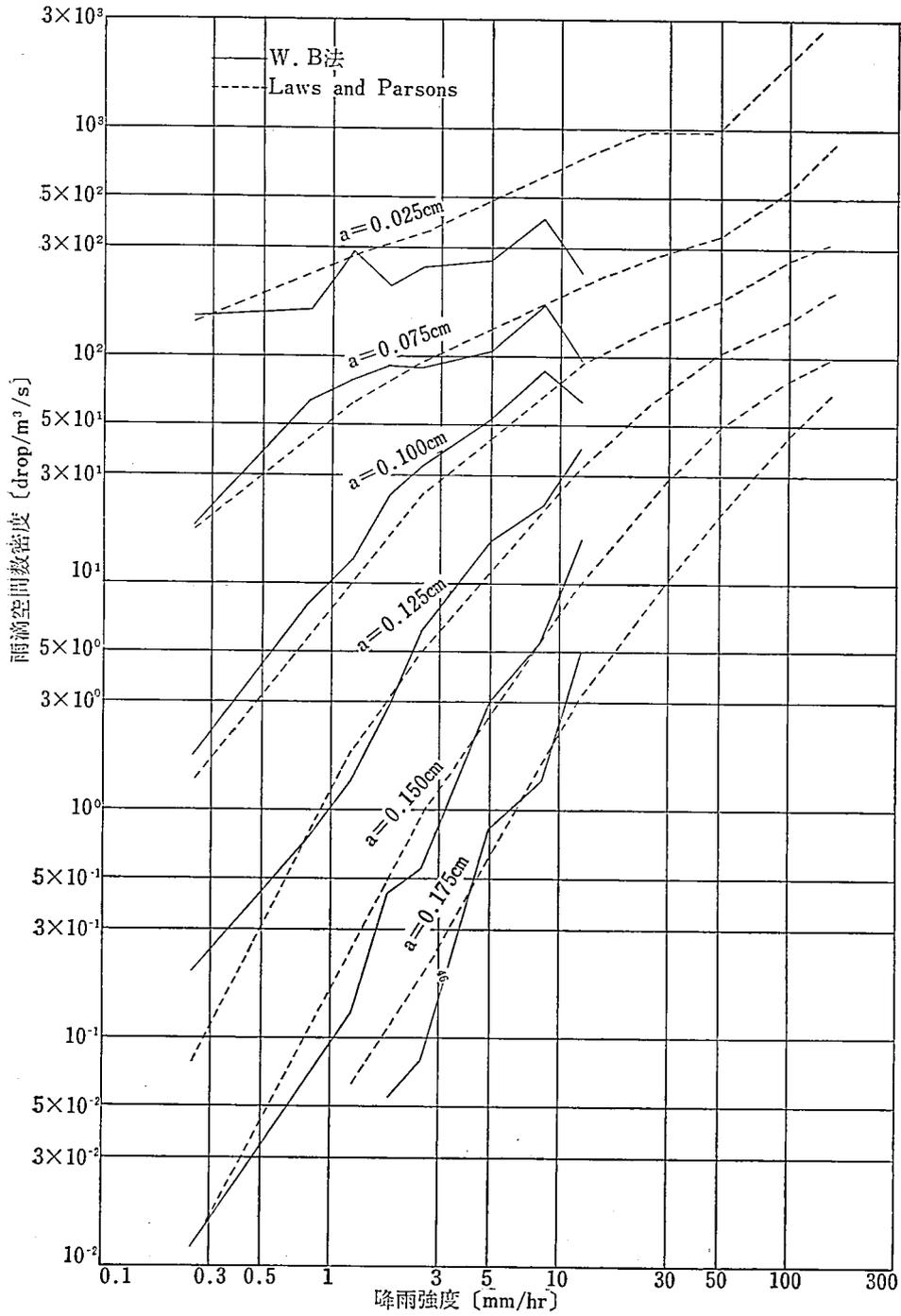


図6. 雨滴半径をパラメータにした雨滴空間数密度曲線

表-1

		空間含水量 [mm ³ /m ³ /s]			降水量 [mm ³ /m ² /s]		
		Nr ^a 粒径小	Nr ^R 粒径中	Nr ^b 粒径大	Nr ^a 粒径小	Nr ^R 粒径中	Nr ^b 粒径大
1 mm/hr	N	15 (0.15)	64 (0.84)	38 (0.45)	18 —	256 (0.92)	207 (0.75)
	L & P	74	74	74	275	275	275
6 mm/hr	N	987 (22)	312 (5.8)	247 (4.4)	1695 (6.4)	1579 (5.3)	1582 (5.6)
	L & P	370	370	370	1680	1680	1680
12mm/hr	N	407 (7.8)	300 (5.5)	277 (5.0)	1580 (5.7)	1670 (6.0)	1749 (6.3)
	L & P	590	590	590	3300	3300	3300

雨滴粒度分布から求めた含水量および降水量 N；西辻氏の値,
L & P；Laws and Parsons の値, ()は L & P の式から求めた
降雨強度 [mm/hr]

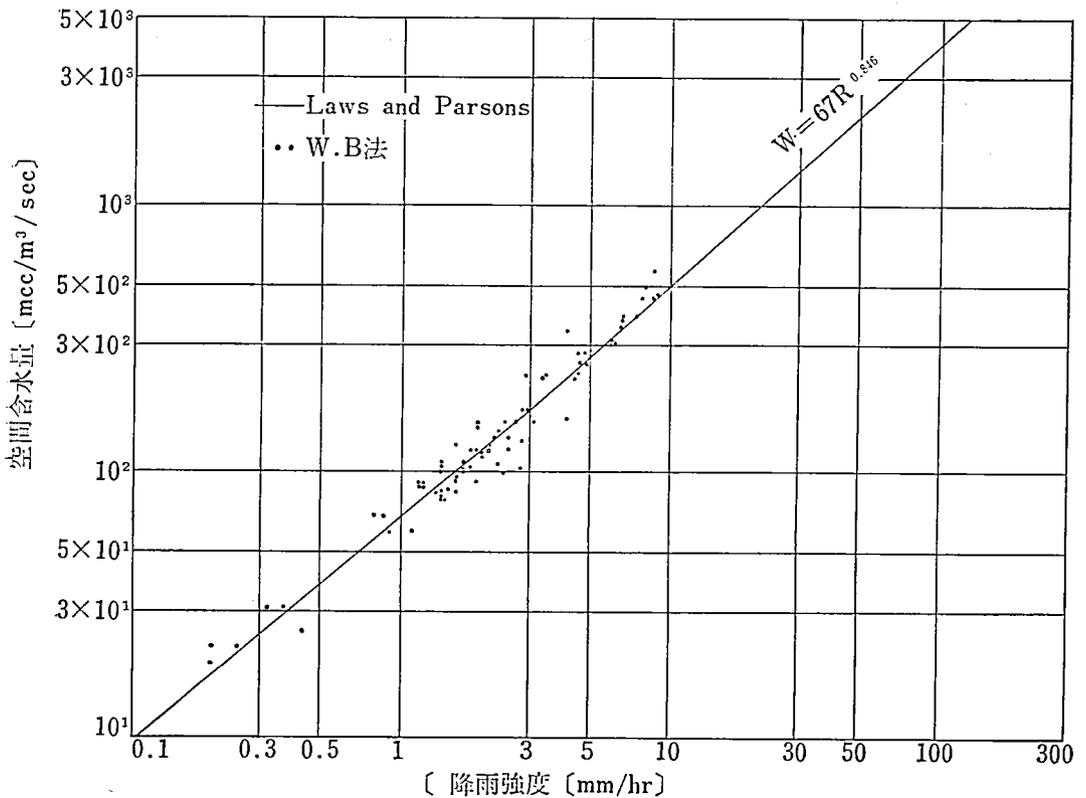


図7. 降雨強度から求めた空間含水量

Parsons の粒度分布と比較してある。また中ぐらいの大きさの雨滴が多く含まれる場合の
雨滴空間数密度を Nr^R と書き, Nr^R, Nr^a および Nr^b の粒度分布を, Laws & Parsons

の値を基準にして降雨強度に換算したものを表1に示している。図3、図4および表1から Nr^B の降雨強度を計算してみると、空間含水量および着地降雨量のいずれで求めても、降雨強度の値は表記されている値の半分にしかならない。 Nr^a と Nr^b も 6mm/hr ではほぼ Laws & Parsons と同じであるが他の 1mm/hr と 12mm/hr では差が大きく、値そのものに大きなバラツキがある。したがって、 Nr^a 、 Nr^b の分類の仕方に無理があると思われる。

図5は筆者の water blue 法から求めた測定値と Laws & Parsons の値を比較したものの、図6は雨滴半径をパラメータにした場合の降雨強度の変化に対する雨滴空間数密度を water blue 法と Laws & Parsons の値について比較したものである。いずれの場合も単純な直線関係で表わせないことは明らかである。Laws & Parsons によると 1m^3 あたりの空間雨滴含水量 W と降雨強度 P との間には

$$W = C \cdot R^B \tag{4}$$

の関係があり、 C は67、 B は0.846であるとされている。

water blue 法から求めた空間雨滴含水量がこの関係を満たすか否かをみるために降雨強度に対してプロットしてみると図7のようになり、(4)式の直線とかなり良い一致を示す。したがって water blue 法による測定はかなり良い精度のものであるといえよう。

6. 降雨強度と減衰量

降雨強度および粒度分布の実測結果をもとにして降雨による電波の減衰量を求めた。た

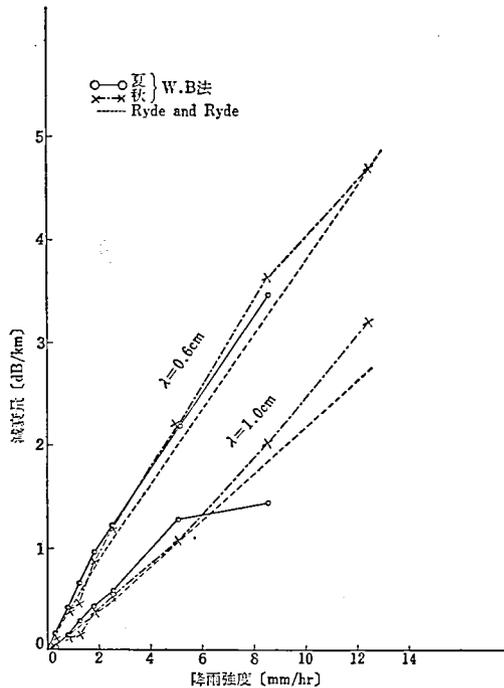


図8. 降雨による減衰曲線
夏、秋およびRyde and Rydeとの比較

だし、雨滴の温度を 18°C と仮定して Ryde の計算値を用いた。また風等による降雨の捕捉率の変化や電波の偏波面の違いによる減衰量の差異は無視する。図 8 は実測による夏期および秋期の雨滴粒度分布の変化から求めた電波の減衰曲線で、比較のため Ryde の減衰曲線も示してある。データが十分でないので正確なことはいえないが、季節による減衰量の差異は存在するようである。ただし、雨滴粒度分布の図 1, 2 から予想されるほど大きな差は認められず、また Ryde の減衰曲線と比べても $\lambda=1.0\text{cm}$ では 10mm/hr の降雨強度に対して 0.5dB/km ทีเดียว減衰量が増加するだけで、季節による変化はほとんど無視しうる程度である。直径 44.7cm 0.1mm/pulse の転倒ます型雨量計による降雨強度の測定と water blue 法による測定を同時に行ない、両者の結果を比較したものが図 9 に示した相関図である。転倒ます型雨量計を用いたのは、これが降雨量測定の気象機器として極

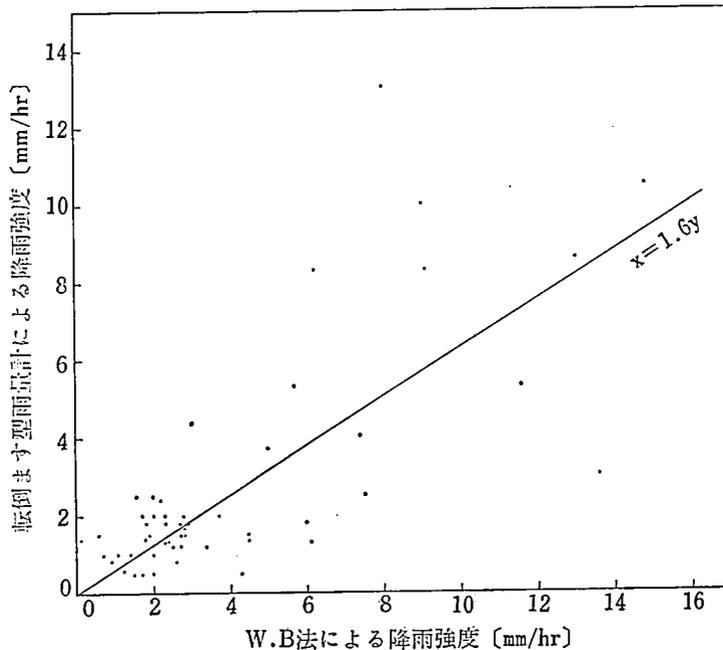


図9. water blue法と雨量計との降雨強度の比較

めて一般的なものであるため、その測定値から瞬間降雨強度を知ることができればきわめて好都合と考えたからである。図 9 からわかるように、 0.1mm/pulse の転倒ます型雨量計の降雨強度 (y) は water blue 法から求めた降雨強度 (x) に対してほぼ $x=1.6y$ の直線関係にあり、 0.1mm/pulse の転倒ます型雨量計によって降雨強度を測定すれば、その値を 1.6 倍することによって瞬間降雨強度を知ることができる。船川等⁽⁶⁾ は伝播試験と同時に 3 個の雨量計を用いて降雨強度の測定を行ない、両者の結果から減衰量を求めているが、その際用いた貯水フロート型雨量計の感度を 0.1mm/pulse 転倒ます型雨量計と同程度 (貯水フロート式は高感度であるが、データとして 3 分間の平均値を用いている) とみなすと、この雨量計の降雨強度を 1.6 倍したものが water blue 法により求めた瞬間降雨強度と等しくなる。そこで船川の求めた降雨強度対減衰量のデータを瞬間降雨強度によって補正してみると図 10 のようになり、雨量計の指示する降雨強度より water blue 法で測定した瞬間降雨強度の方が減衰量の実測値によく一致することがわかる。つまり同じ Ryde の

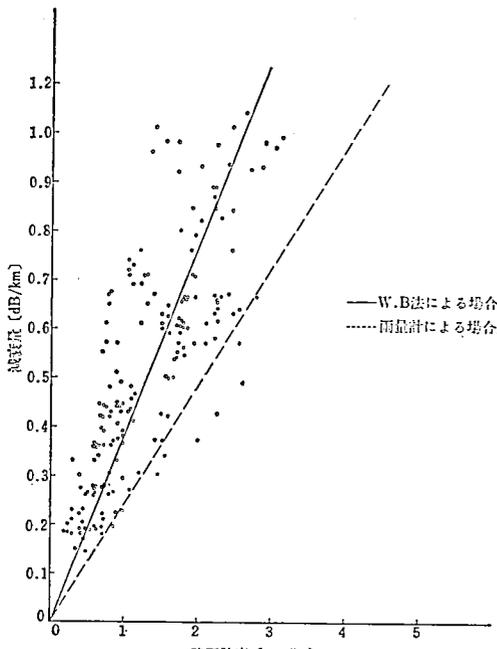


図10. 降雨による減衰曲線

減衰理論式を用いても、時定数の大きな雨量計による降雨強度と water blue 法による瞬時値に近い降雨強度とでは後者の方が実際の伝播試験の結果を良く説明できることになる。

7. むすび

転倒ます型雨量計や時定数の大きい雨量計は瞬時降雨強度を与えないので、このような雨量計による降雨強度を用いたのでは降雨強度対減衰量の曲線は Ryde の減衰曲線に一致しない。しかし時定数の大きい雨量計でも、たとえば直径 44.7cm 0.1mm/pulse の転倒ます型雨量計を用いた場合、その降雨強度の値を 1.6 倍すれば概略ながら瞬時降雨強度が求まるので、その値を用いれば短区間伝播の際の降雨強度による電波の減衰を説明するには Laws & Parsons の粒度分布と Ryde の理論値は十分有効である。

雨滴粒度分布は降雨量の少ないとき大きく変動するといわれているが、筆者の測定結果では大きいのは降雨強度の変動であって粒度分布ではない。小雨の場合にも同一降雨強度に対して粒度分布はそれ程大きく変動してないようである。時定数の大きな通常の雨量計では、降雨量の少ないときに感度が低下して降雨強度の変化を忠実に記録出来ないの、見掛上粒度分布が変動するという結果になるものと考えられる。

Water blue 法で得られるデータは風のあまり強くないときに限られるので、雨が強くなって降雨の補償率が低下した場合や up draft のある場合⁹⁾には雨滴の落下速度が静止大気中の終末速度よりも低下し、減衰量は増大する。逆に down draft のある場合には雨滴の落下速度が大きくなり、減衰量は減少することになる。

8. 謝 辞

最後に本研究を行なうに際して研究の機会を与えて下さった本学木名瀬教授、ならびに原稿を閲読されて懇切なご指導とご助言を賜った恩師である明治大学築地教授および常に激励し忠告を与えて下さる東海大学森屋助教授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庄司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。(昭和48年5月)

参 考 文 献

1. 鶴飼, 島田; 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, AP70-21, (June 1970)
2. D. E. Kerr; "Propagation of short radio waves" p.641, M. I. T. Radiation Laboratory series 13, (1951)

- 3 .J. O. Lows, D. A. Parsons ; "The relation of raindrop size to intensity."
Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 24, p. 452, (1943)
4. 西辻, 川瀬他 ; ミリ波およびマイクロ波帯における降雨時の電波減衰量に関する問題点
信学会, アンテナ伝播研究会資料, AP 70-21, (june 1970)
5. 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. 54-B, No. 8, (Aug. 1971)
6. 福 士 ; 降雨による電波の減衰と降雨強度
明星大学理工学部研究紀要, No. 8, (March 1973)
7. 小 口 ; 降雨による電磁波の減衰の偏波面による違い。
信学誌, VOL. 45, No. 2, (Fed. 1963)
8. K. Funakawa, J. Kato ; "Experiment studies of propagation characters of 8.8mm wave
on the 24Km path."
Journal of the radio reserch Lab., VOL. 9, No. 45, (Spet. 1962)
9. R. A. Semplak, R. H. Turrin ; "Some measurement of attenuation by rainfall at 18.5 GHz"
B. S. T. J., VOL. 48, No. 6, P1767, (july-Ang. 1969)