

雨滴粒径分布測定方式の開発

宮下功寛* 中野愛美** 安田茂** 林理三雄**

The development of raindrop size distribution measuring method

Norihiro MIYASHITA, Narumi NAKANO, Shigeru YASUDA, Risao HAYASHI

The measuring method of raindrop size distribution using the digital camera was developed. The raindrop which falls from a slit is photographed by the digital camera of the 35×10^4 pixel, and measures the raindrop size by making use of the dot number. The effectiveness of this measuring method was confirmed from the observation results obtained due to the natural rainfall.

1 はじめに

衛星通信の回線設計において、最も影響の大きい伝搬要因は降雨減衰である。降雨減衰を調べるためには、衛星電波が通過してきた伝搬通路上の雨滴粒径分布（雨滴のサイズ別の空間密度）を知る必要がある。しかしながら雨滴粒径分布の測定は困難であり、これまでに様々な方法が試みられてきたが、その多くは煩雑な手順を要する、常時観測に不向きであるといった問題があった。そのため Marshall と Palmer や Joss と Waldvogel¹⁾ が測定した雨滴粒径分布の経験値を元に観測から雨滴

粒径分布を推定してきた。

本研究では簡易、低コスト、直接的な測定を可能にするデジタルカメラを用いた測定方式を確立させ、それによる降雨減衰特性の解明を目指している²⁾。

2 測定システム

2-1 測定方法

図1は雨滴粒径分布測定装置の概略図である。スリット(10cm×90cm)から落下してくる雨滴をデジタルカメラ(SANYO製DSC-V1:35万画素)で撮影する。撮影距離を40~50cm、シャッタースピードを4000分の1秒に設定し、パソコンから遠隔操作し、15秒間隔でシャッターを切る。2台の

2000年7月15日受理

* 博士前期課程電気電子工学専攻

** 電気電子工学科

カメラを用いることで連続撮影を可能にしている。

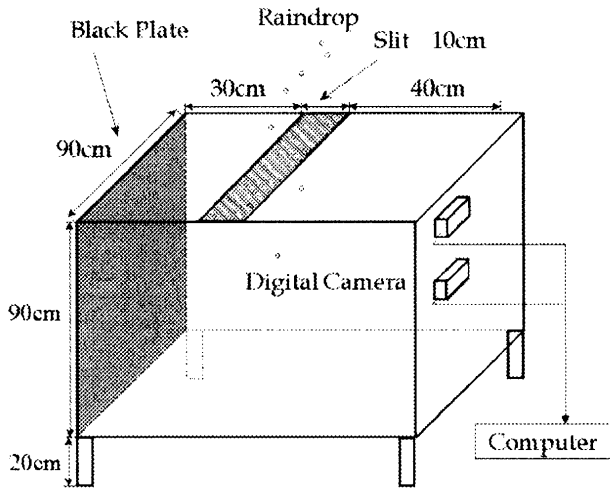


図1. 測定システム概略図

カメラの正面には、雨滴を判別しやすくするために黒い板を置いてある。装置のサイズは、撮影空間いっぱいには雨滴を撮影できるように装置の横幅を90cmに設定し、黒い板に雨滴が付着するのをできる限り防ぐために装置を地面から20cm上げ、黒い板からスリットまでの距離を30cmに設定した。撮影中、黒い板に雨滴が付着した場合は随時拭き取っている。デジタルカメラの解像度から計算すると実効直径0.7mm以上の雨滴の撮影が可能だが、実際に撮影を行うとピンぼけや入射したストロボ光の散乱の影響で約0.7mm大きく撮影される。これを換算することにより実効直径0.1mm以上の雨滴が撮影可能である。詳細は「3-1 シリカゲルによる試験」で述べる。

2-2 データ処理法

撮影された雨滴の画像フォーマットをJPEGからBMPに変換し、雨滴のドット数からデジタルカメラの解像度を用いて撮像面積を計算する。そしてシャッタースピード、雨滴の形状(PruppacherとPitter³⁾⁴⁾、雨滴の終端速度(GunnとKinzer⁵⁾)、

補正值を用いて雨滴の実効直径を算出する。

いま、実効直径Dの前後 $\pm \Delta D/2$ の範囲内にある雨滴の空間密度を $N(D) \cdot \Delta D$ とし、 $D \pm \Delta D/2$ の範囲の雨滴が観測空間V中に $N^d(D)$ 個撮影されたとき、雨滴粒径分布 $N(D)$ は次式で求められる。

$$N(D) = \frac{N^d(D)}{\Delta D \cdot V} \quad (1)$$

実際のデータ処理では $\Delta D = 0.2\text{mm}$ 、 $V = 0.0558\text{m}^3$ (1分間の撮影枚数(4枚)分の観測空間)として実効直径D(mm)の1分間の雨滴粒径分布 $N(D)(\text{m}^{-3}\text{mm}^{-1})$ を計算している。こうして得られた雨滴粒径分布から降雨強度、衛星電波の降雨減衰の推定を行う。

降雨強度R(mm/h)は、次式で求める¹⁾。

$$R = 3600 \times 10^{-6} \int_0^{D_{\max}} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 v(D) N(D) dD \quad (2)$$

ただし、 $v(D)$ は実効直径D(mm)の雨滴の落下速度(m/sec)、 D_{\max} は実在する雨滴の最大実効直径である。

次に衛星電波の降雨減衰の算出について述べる。Mieの理論により、直径D(mm)の球形雨滴の全断面面積 Q_t は、次式となる⁶⁾。

$$Q_t = -\frac{\lambda^2}{2\pi} \text{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(a_n + b_n) \quad (3)$$

ただし、 λ は電波の波長(m)、 a_n 、 b_n は電波の波長、雨滴の直径、水の複素屈折率の関数として次式のように表される⁶⁾。

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

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

$j_n(z)$: n次の球ベッセル関数

$h_n^{(2)}(z)$: n 次の第2種球ハンケル関数
 $[z \cdot j_n(z)]', [z \cdot h_n^{(2)}(z)]'$: [] の z に関する微分
 ρ : $\pi D / \lambda$
 n_c : 水の複素屈折率

降雨減衰定数 γ (dB/km) は、球形雨滴の全断面積 Q_t を用いて次式のように表せる。

$$\gamma = 10^4 \cdot \log_{10} e \cdot \int_0^{D_{\max}} Q_t \cdot N(D) dD \quad (6)$$

ここで雨域高度 H (km) は実験的に次式の間接関係があることがわかっている⁷⁾。

$$H = \frac{1}{4.6} (T - 2.4) \quad (7)$$

T : 地上気温(°C)

よって降雨減衰 A (dB) は、衛星の仰角を θ とすると次式で求まる。

$$A = \gamma \cdot \frac{H}{\sin \theta} \quad (8)$$

3 観測結果

3-1 シリカゲルによる試験

雨滴とサイズや形状に近いシリカゲルを用いて測定装置の試験を行った。様々なサイズのシリカゲルを測定して真値と測定値を比較した。その結果を表1に示す。約0.7mmの誤差が出た。これは撮影物のピンぼけや撮影物に入射したストロボ光の散乱により実際のサイズより大きく撮影されたのだと考えられる。雨滴になるとシリカゲルよりも透明度が増加し、誤差も変化すると予想されるが、今回は自然降雨の測定値から補正值0.7mmを引いた値で解析を行い検討した。

3-2 自然降雨の観測

我々は同時に降雨強度、降雨減衰も観測してお

表1 シリカゲルによる試験結果

Diameter(mm)	Measurement value(mm)	Error(mm)
2.6	3.29	0.69
2.5	3.33	0.83
2.4	3.08	0.68
2.3	3.02	0.69
1.4	2.17	0.77
1.0	1.71	0.71

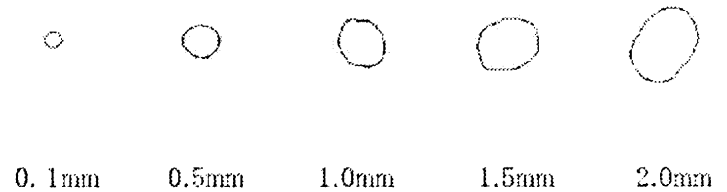


図2 観測された雨滴の輪郭
(下記のサイズは実効直径である)

り、衛星放送波(12GHz帯:BS7ch)をアンテナ(直径50cm)で受信して、この受信点に雨滴粒径分布測定装置と雨量計を設置している。1999年6月18日(16:03~18:17)、28日(10:35~11:34)の観測結果を示す。平均降雨強度はそれぞれ2.64mm/h、9.57mm/hであった。

(1) 観測データ

図2は撮影された雨滴の輪郭をトレースしたものである。

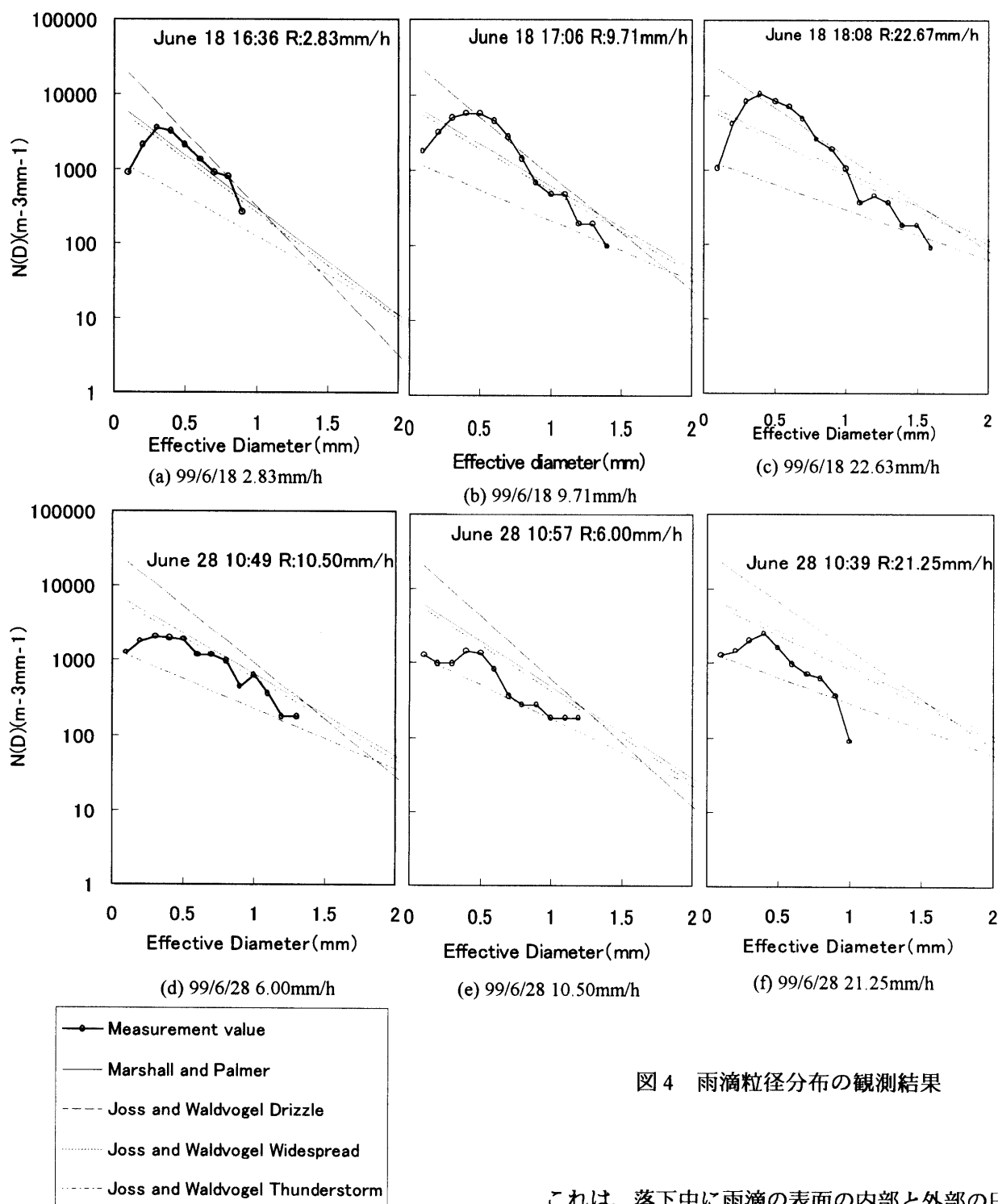


図4 雨滴粒径分布の観測結果

これは、落下中に雨滴の表面の内部と外部の圧力のバランスが変化するためだと考えられる。

シャッタースピードによる残像の影響から雨滴の像が少し落下方向に長くなっているが、Pruppacher と Pitter の示している雨滴の形状と同様にサイズが小さい場合にはほぼ球形であり、サイズが大きくなるにつれて球から回転楕円体に変形していた。

(2)観測データの処理結果

図4は6月18日、28日の雨滴粒径分布の観測結果である。Marshall と Palmer、Joss と Waldvogel の経験式による分布を挿入してある。Joss と

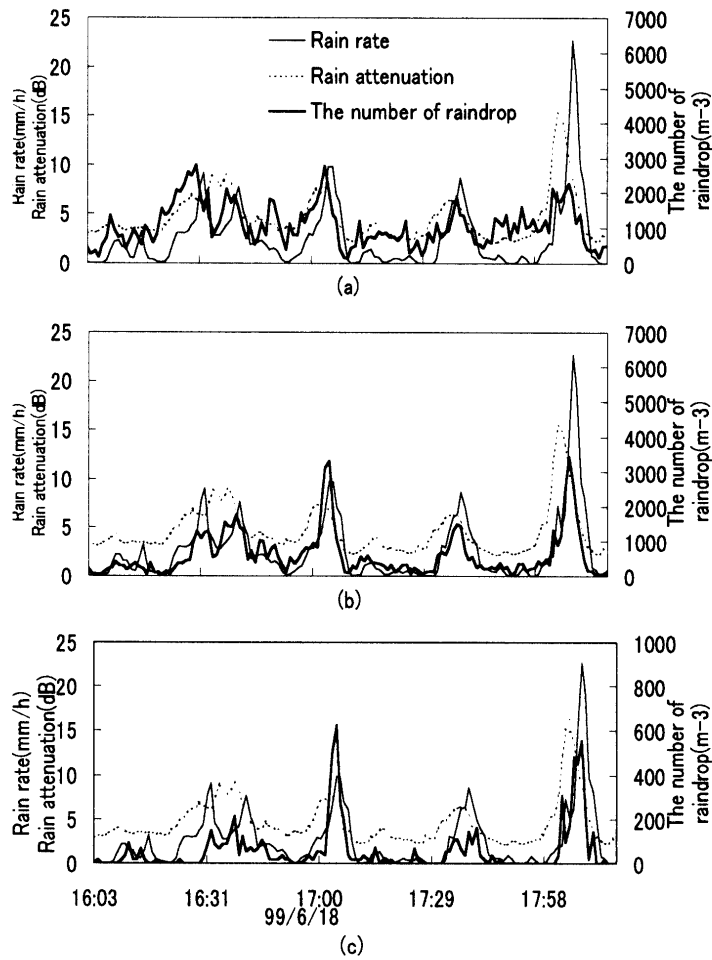


図 5. 粒径別の雨滴数、降雨強度、降雨減衰の時間変化(99/6/18)

Waldvogel の経験式については、霧雨(Drizzle)、並雨(Widespread)、雷雨(Thunderstorm)と雨の種類により 3 つに分類されている。

18 日の雨滴粒径分布は、実効直径 0.3mm 未満の雨滴は実効直径が小さくなるにつれて経験式に反し減少しているが、実効直径 0.3mm 以上の雨滴は Joss と Waldvogel の霧雨時の経験式に近いことがわかる。他の時刻でも同様の傾向が見られたことから、霧雨に近いタイプの雨だったことがわかる。実効直径 0.3mm 未満の雨滴が減少している原因は、経験式自体が 1mm 以上の雨滴の計測に基づいており 1mm 未満については挿入されているに過ぎないこと、落下中に小さな雨滴は衝突して大きくなることが考えられる。

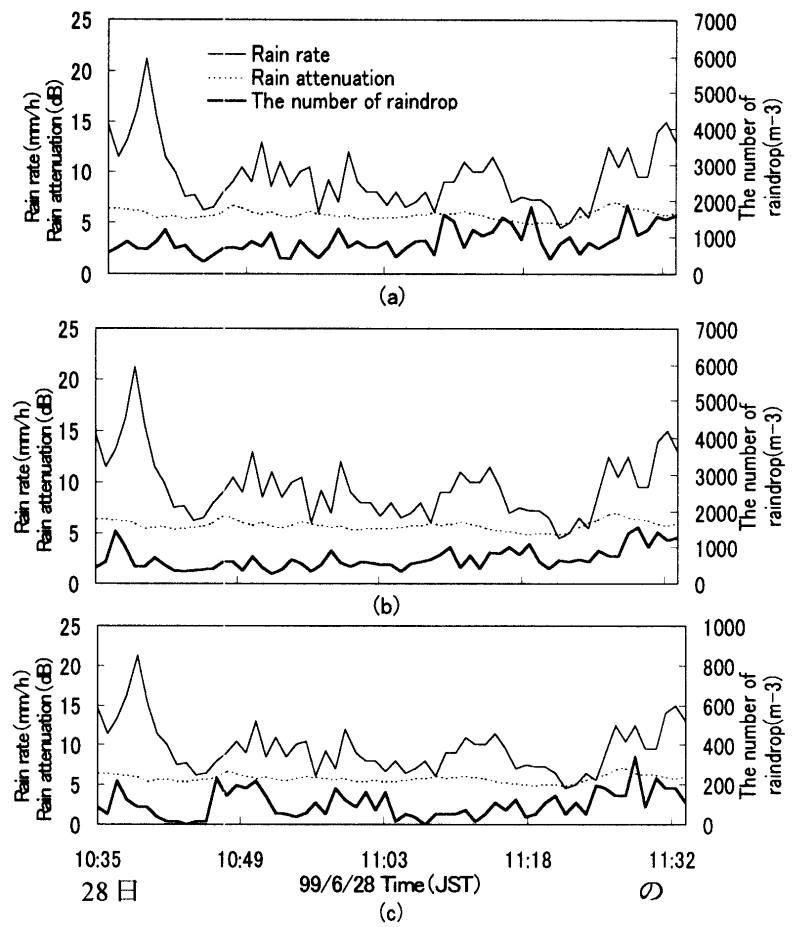


図 6. 粒径別の雨滴数、降雨強度、降雨減衰の時間変化(99/6/28)

雨滴粒径分布は Joss と Waldvogel の並雨時と雷雨時の経験式の間で不自然な形のグラフを描いていることがわかる。他の時刻でも同様の傾向が見られたことから、並雨または雷雨に近いタイプの雨だったことがわかる。

また、雨滴粒径分布 $N(D)$ の値が小さくなるにつれてグラフが不自然な形を描いている。これは、観測される雨滴数が少なくなるにつれて測定精度が落ちるためである。この装置では 1 分間の雨滴粒径分布は観測される雨滴数が 1 個の時、 $N(D)$ は $89.5\text{m}^{-3}\text{mm}^{-1}$ になるためそれ以下の雨滴粒径分布は測定できない。

図 5、6 は粒径別の雨滴数、降雨強度、降雨減衰の時間変化である。それぞれ(a)は実効直径 0.4mm 未満の雨滴数、(b)は実効直径 0.4mm 以上 0.8mm

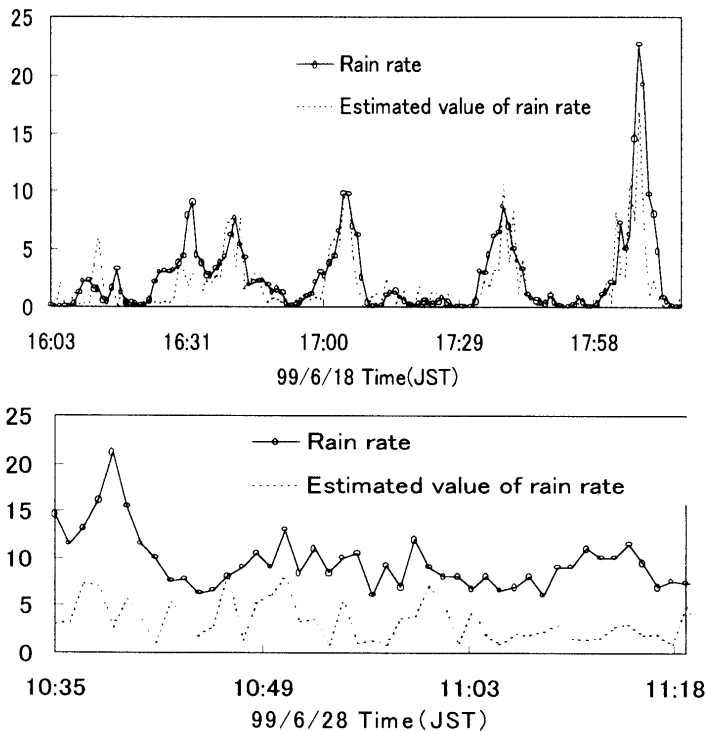


図 7.降雨強度の観測地と推定値の比較(1)

未満の雨滴数、(c)は実効直径 0.8mm 以上の雨滴数である。

18 日は降雨強度の変化の激しい散発的な雨だったことがわかる。降雨強度の変化に伴い雨滴数、降雨減衰が共に変化し、相関関係があることがわかる。とくに実効直径 0.4mm 以上 0.8mm 未満の雨滴数は降雨強度と高い相関関係があった。これは図 4 を見てもわかるようにこのサイズの雨滴が最も多く観測されたため降雨強度に対する寄与が大きかったのだと考えられる。

28 日は 10mm/h 前後の雨が降り続けていることがわかる。降雨強度の変化にあまり関係なく雨滴数は変化しており、降雨減衰はほぼ一定であった。

図 7 は 18 日、28 日の降雨強度の観測値と推定値である。18 日は観測値と推定値がおおよそ一致した。しかし、28 日は観測値にくらべて推定値が小さかった。これは、推定方法に問題がある。雨滴粒径分布 $N(D)$ を決定する際に観測されないサイズの雨滴(実効直径約 1.5mm 以上)については、観測値の延長線上にあると仮定している。18 日の場合、実効直径 0.3mm 以上の雨滴ではグラフが経

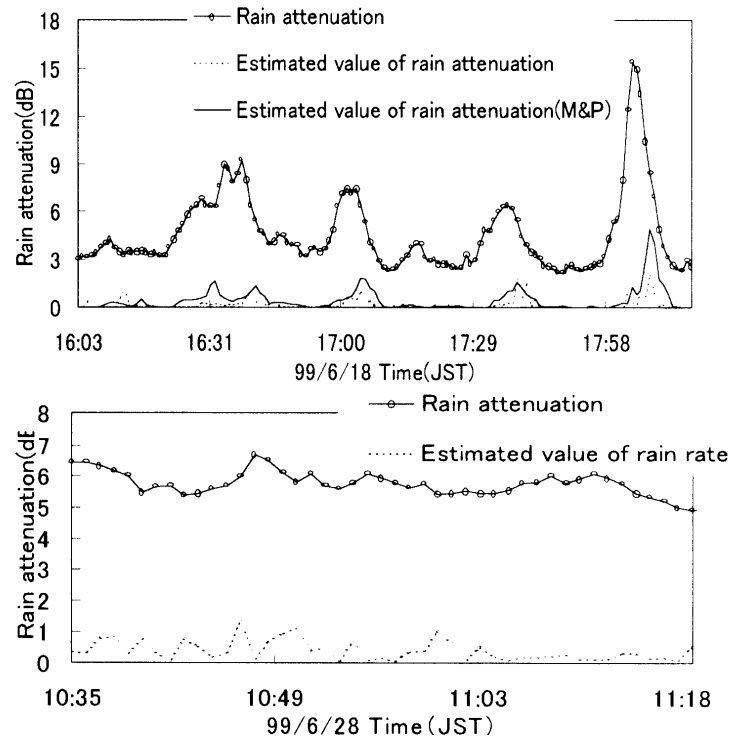


図 8.降雨強度の観測地と推定値の比較(2)

験式に沿ってほぼ直線であるため推定しやすい。ところが 28 日はグラフが不自然な形を描いているため推定しにくいことが原因であると考えられる。 $89.5\text{m}^{-3}\text{mm}^{-1}$ 以下の雨滴粒径分布の測定が可能な装置の開発が必要である。

図 8 は降雨減衰の観測値と推定値である。18 日、28 日ともに観測値にくらべて推定値ははるかに小さかった。これは受信点での降雨減衰は伝搬する区間での降雨減衰の総和であり、推定値は受信点での雨滴粒径分布から求めていること、対流性降雨の場合、雨滴層高度の推定が困難なことが考えられる。

4 まとめ

観測された雨滴の輪郭が Pruppacher と Pitter の示している雨滴の形状に似ていること、雨滴粒径分布の観測値が経験式とほぼ一致していること、18 日の雨滴粒径分布の観測値から計算した降雨強度の推定値が雨量計による観測値とほぼ一致していることからデジタルカメラを用いた雨滴粒径

分布の測定は有効であることがわかった。さらに補正值として 0.7mm を使うことの正当性が確認できた。

また、雨のタイプによって雨滴粒径分布、降雨減衰の様子がまったく異なることがわかった。今後は降雨減衰特性の詳細な解析を可能にするため、高精度な装置の開発、伝搬区間での雨滴粒径分布の測定方法の開発、より多くの観測データの取得が必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、実験に御協力いただいた通信システム講座の皆様から感謝いたします。

参考文献

- 1) 進士昌明、“無線通信の電波伝搬”, 電子情報通信学会
- 2) 宮下功寛, 安田茂, 中野愛美, 林理三雄, “雨滴粒径分布の測定方式の開発と降雨減衰の推定”, 平成 11 年電気関係学会九州支部連合大会, 955
- 3) H.R.Pruppacher and R.L.Pitter, “A semi-empirical determination of the shape of cloud and raindrops”, Jour. Atmos. Sci., 28, p. 86 (1971)
- 4) T.Oguchi, “Scattering properties of Pruppacher-and-Pitter form raindrops and cross polarization due to rain: Calculation at 11, 13, 19.3 and 34.8 GHz”, Radio Sci., 12(1), p. 41 (1977)
- 5) K.L.S.Gunn and G.D.Kinzer, “The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air”, Jour. Meteor., 6, p. 243 (1949)
- 6) D.E.Kerr, Propagation of Short Radio Waves, Radiation Labs, Series, 13, Chapter 6
- 7) M.Fujita, K.Nakamura, T.Ihara, R.Hayashi, “Seasonal

variations of statistics in millimeter wave earth-satellite link due to bright-band height”, Electronics letters, Vol 15, No. 20, p. 654, (1980)