

雨滴粒径分布の鉛直構造の定式化

中川 勝広・中北 英一・佐藤 亨・池淵 周一

FORMULATION OF THE VERTICAL PROFILE OF DSD

By Katsuhiko NAKAGAWA, Eiichi NAKAKITA, Tomi SATO and Shuichi IKEBUCHI

Synopsis

Radar rain gage can observe rainfall instantaneously and widely. But the rainfall intensity on the ground is not equal to the rainfall intensity estimated from radar rain gage. To improve accuracy in the radar-estimated rainfall, we observe and analyze the vertical profile of the rain drop size distribution (DSD), and utilize the results into the new formulation of the vertical profile of DSD.

The vertical profile of DSD is observed by a vertical pointing VHF Doppler radar in Japan named MU (Middle and Upper) radar. The MU radar can detect vertical profile of Doppler spectrum that are composed of both the rain drop itself and air movements. The DSD on the ground is observed by Disdrometer.

Firstly, a new formulation of DSD which holds among rainfall type, rainfall intensity and DSD observed Disdrometer is developed. Secondly, the analysis of vertical profile of DSD in rainfall type are carried out to investigate the possibility of finding relations in DSD.

1. 序 論

降雨現象を広域にわたって瞬時に観測できる手段としてはレーダー雨量計がある。レーダー雨量計は気象庁や建設省によって設置されておりほぼ日本全土を覆って降雨を観測するネットワークが完成し、ルーチ的に観測が行われている。しかし、レーダー雨量計によって推定される降雨強度と地上で観測される降雨強度が必ずしも一致せず、実用的なダム操作や流出解析のインプット情報に利用するにはいたっていない^{1), 2)}。

その原因の一つとして、レーダー雨量計から降雨強度を求める際に、雨滴粒径分布に依存するレーダー反射因子を用いるが、雨滴粒径分布は降雨の種類によって変化し、連続した降雨中でも大きく変動するために雨滴粒径分布を正確に把握し定式化することが重要となる。また、レーダー雨量計での降雨強度は上空のもので地上での降雨と異なり、レーダー雨量計から地上の雨を推定する際に降雨の3次元構造を考慮していないことも精度に影響を与えている^{3), 4), 5), 6), 7)}。

本研究では、レーダー雨量計による地上雨量の推定精度の向上をはかるために、地上における雨滴粒径分布の観測および鉛直方向の雨滴の落下速度のドップラースペクトルから雨滴粒径分布の鉛直分布を推定できる京都大学超高層電波研究センターのMUレーダー (Middle and Upper Rader) による観測を行い、地上の雨滴粒径分布に関しては、解析することにより、降雨タイプ、降雨強度との関係から雨滴粒径分布を新たに定式化を行う。鉛直方向の雨滴粒径分布に関しては、降雨タイプによる雨滴粒径分布の鉛直構造を定性的

に明らかにし、雨滴粒径分布の高度依存性について詳細な解析を行い、鉛直方向の雨滴粒径分布の利用可能性について述べる。

2. 観測概要

2.1 観測項目

滋賀県甲賀郡信楽町の京都大学超高層電波研究センターの MU レーダー観測所において地上における雨滴粒径分布の観測、および鉛直方向の雨滴の落下速度のドップラースペクトルから雨滴粒径分布を推定できる京都大学超高層電波研究センターの MU レーダー (Middle and Upper Rader) による観測を実施した。観測項目としては以下のとおりである。

- Disdrometer による雨滴粒径分布の観測 (1 分間の積算値)
 - 光学式雨滴分析器による雨滴粒径分布の観測 (30 秒間の積算値)
 - 光学式雨量計による降雨強度の観測 (1 分間の積算値)
 - 転倒マス式雨量計による降雨強度の観測 (60 分間のデータを用いる)
 - MU レーダーによる大気鉛直風速と雨滴の落下速度のドップラースペクトル分布の観測 (3 分間隔)
- 地上の雨滴粒径分布の降雨タイプ別の定式化に際して主に解析に用いる観測データは、Disdrometer と光学式雨量計である。転倒マス式雨量計で観測したデータは光学式雨量計の精度チェックとして用いる。

Table 1 Rainfall cases and rainfall types for ground surface observation.

	Start time	End time	Hours	Rainfall type
1	1994/07/07/17:00	07/08/01:59	9	Baiu front
2	1994/07/08/21:00	07/09/01:59	5	Baiu front
3	1994/07/23/00:00	07/23/03:59	4	Typhoon
4	1994/07/24/01:00	07/24/05:59	5	Typhoon
5	1994/07/30/04:00	07/30/10:59	7	Low pressure
6	1994/08/21/17:00	08/21/23:59	7	Atomospheric instability
7	1994/09/16/00:00	09/16/13:59	13	Autumn rain front
8	1994/09/16/20:00	09/17/01:59	6	Autumn rain front
9	1994/09/17/09:00	09/17/16:59	8	Cold low
10	1994/09/29/01:00	09/30/07:59	31	Typhoon
11	1994/12/09/03:00	12/09/13:59	11	Cold front
12	1994/12/11/07:00	12/12/02:59	17	Cold front
13	1994/12/26/17:00	12/26/22:59	6	Cold low

Table 2 Rainfall cases observed by MU radar.

	Start time	End time	Hours	Rainfall type
1	1994/07/07/17:00	07/08/01:59	9	Baiu front
10	1994/09/29/01:00	09/30/07:59	31	Typhoon

2.2 解析対象期間

観測は 1994 年 6 月下旬より実施しており、光学式雨量計で観測されたデータを用いて降雨が観測されている期間を調査し、降雨がある程度の時間観測されているものを選択し、解析対象期間を決定した。**Table. 1** に地上における雨滴粒径分布の解析に用いた降雨期間および降雨タイプを、**Table. 2** に MU レーダーによる鉛直方向の雨滴粒径分布の解析に用いた降雨の期間および降雨タイプを示す。降雨タイプの

判断に関しては、解析期間内で得られた地上の天気図から行った。

2.3 Disdrometer について

地上での雨滴の粒径分布を観測するために用いた雨滴計は、Disdrometer RD69 である。この雨滴計はマイクロフォン型で振動コーンに雨滴が衝突する運動量をパルス電圧に変換し、予め同定しておいた雨滴粒径に対応づける仕組みとなっている。0.3 mm～5.0 mm までの 19 の階級と 5.0 mm 以上の階級の計 20 の各階級で計測された雨滴の個数が得られる。各階級で観測される雨滴の直径は **Table. 3** に示すとおりである。観測された雨滴の個数から雨滴粒径分布 $N(D)$ [$\text{m}^{-3}\text{mm}^{-1}$] に変換するには

$$N(D_i) = \frac{n(i)}{S \times T_{obs} \times V_i(D_i) \times \Delta D_i} \dots\dots\dots (1)$$

を用いる。ここで、

$N(D)$: 単位体積空間に含まれる直径 D の雨滴の個数 ($\text{m}^{-3}\text{mm}^{-1}$)

D : 雨滴の直径 D (mm) (各階級の直径の中央値)

ΔD_i : 階級 i の粒径の階級幅

$n(i)$: T_{obs} (sec) 時間内に観測された階級 i の雨滴の個数

S : disdrometer の感知部の表面積 (5000 mm^2)

T_{obs} : 観測時間 (60 sec)

$V_i(D_i)$: 雨滴の落下速度 (式(2))

である。

Table 3 Drop size channels of the Disdrometer.

Channel	Diameter of rain drop	Channel	Diameter of rain drop
1	0.313mm～0.405mm	11	1.748mm～2.077mm
2	0.405mm～0.505mm	12	2.077mm～2.441mm
3	0.505mm～0.596mm	13	2.441mm～2.727mm
4	0.596mm～0.715mm	14	2.727mm～3.011mm
5	0.715mm～0.827mm	15	3.011mm～3.385mm
6	0.827mm～0.999mm	16	3.385mm～3.704mm
7	0.999mm～1.232mm	17	3.704mm～4.127mm
8	1.232mm～1.429mm	18	4.127mm～4.573mm
9	1.429mm～1.582mm	19	4.573mm～5.145mm
10	1.582mm～1.748mm	20	> 5.145mm

雨滴の落下速度 $V_i(D_i)$ については様々な経験式が提案されているが [12] MU レーダーで観測された雨滴の落下速度のドップラースペクトルから雨滴粒径分布を推定する際に用いる **Sato et al. [9]** が開発したアルゴリズムにおいて **Gunn and Kinzer [13]** による経験式を用いているので、ここでは同様に Gunn and Kinzer の経験式；

$$V_i(D) = - [9.65 - 10.3 \exp(-6D)] \dots\dots\dots (2)$$

を用いる。

2.4 MU レーダーについて

MU レーダーは直径 103 m の円形敷地内に直交 3 素子八木アンテナを 475 本配列した大口径アレイアンテナ

ナを用いた VHF 帯のモノスタティック・パルスレーダー (monostatic pulse radar) であり, 1984 年アジアで最初の気象観測用大型レーダーとして京都大学超高層電波研究センターにより滋賀県甲賀郡信楽町に建設された。MU レーダーは各アンテナ素子毎に固体送受信機を配置し電子的に位相制御を行うアクティブ・フェイズド・アレイ・システム (active phased array system) を採用しており, 高速のビーム走査が可能である。

さらに, MU レーダーは, VHF 帯のドップラーレーダーであるため, UHF 帯および SHF 帯の気象ドップラーレーダーと異なり, 降雨時にも大気乱流からのエコーと雨滴からのエコーが同時に観測可能である。したがって受信されるエコーパワースペクトルを解析することにより風速や大気乱流強度と同時に背景風の影響を除去した正確な雨滴の粒径分布を測定することができる。

3. 地上における雨滴粒径分布

3.1 雨滴粒径分布の定式化

本研究では, 雨滴粒径分布 $N(D)$ をガンマ分布

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\Lambda D) \quad \dots\dots\dots (3)$$

で近似する。なぜなら, MU レーダーから Sato et al. [9] のアルゴリズムを通して推定される雨滴粒径分布がガンマ分布であること, さらに指数分布はガンマ分布の特別な場合 (式(3)の $\mu = 0$ のとき) であるためである。

同定するパラメータは N_0 , μ , Λ である。それを決定するために両辺に $\ln$ をとると

$$\ln N(D) = \ln N_0 + \mu \ln D - \Lambda D \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。これから最小自乗法を用いてパラメータ N_0 , μ , Λ を同定する。同定されるパラメータのうち降雨タイプの影響を受け雨滴粒径分布の特徴を表すパラメータは, μ , Λ と考えられるので, 特にこれらのパラメータ μ , Λ について降雨タイプ別の同定を行う。

3.2 観測結果および考察

3.2.1 雨滴粒径分布と降雨強度

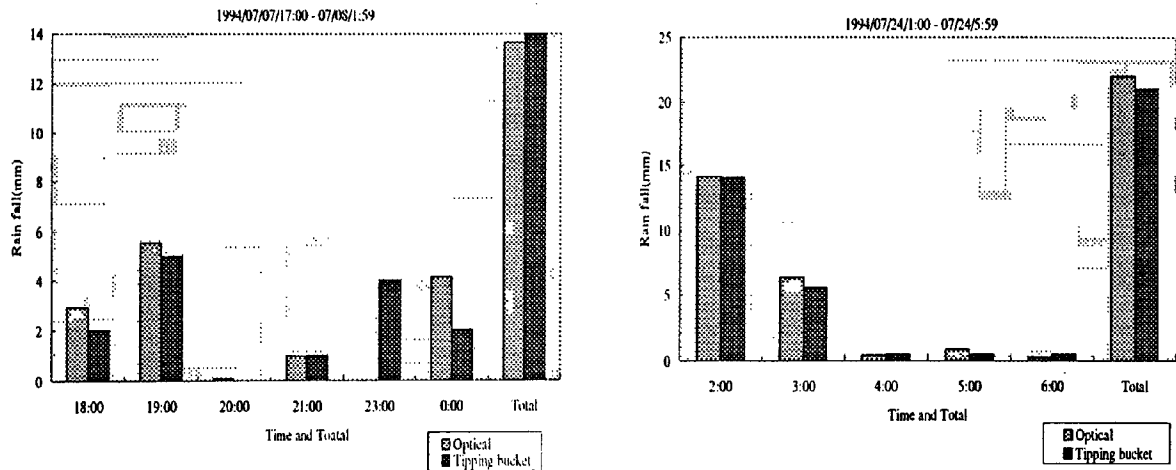
光学式雨量計の精度調査として, 転倒マス式雨量計の観測データと 7 月の降雨を対象に, 各降雨の時間雨量および全期間の総雨量について比較を行った。その結果を Fig. 1 に示す。Fig. 1 (a) は 7 月 7 日の梅雨前線, (b) は 7 月 24 日の台風性の降雨である。これより時間雨量ではわずかに差があるものの, 総雨量はほぼ等しく, 光学式雨量計による降雨強度のデータは精度的に問題ないと考ええる。光学式雨量計による降雨強度のデータは 1 分平均値であるので, 瞬時性のあるレーダー観測の関連からも光学式雨量計で観測された 1 分間の降雨強度を解析に用いる。

3.1 で示した雨滴粒径分布の定式化を降雨タイプおよび降雨強度によって行うことが可能であるかを調べるために, Disdrometer によって観測された各降雨全期間の雨滴粒径分布, 光学式雨量計で観測されたハイエトグラフを比較した図を Fig. 2 ~ Fig. 7 に示す。図中に示した観測値はともに 1 分間値である。各降雨の雨滴粒径分布を比較すると, 分布の傾きすなわち式(3)の Λ が雨滴粒径分布の特徴を表していると考えられるので, 以下に雨滴粒径分布の傾きに関する定性的な考察を述べる。

各降雨の雨滴粒径分布を比較すると, 降雨強度の大きい降雨 (Fig. 3 (台風性), Fig. 5 (秋雨前線), Fig. 6 (台風性) などの降雨強度 15 mm/h 以上を含む降雨) ほど粒径の大きい雨滴 (粒径 4 mm ~ 5 mm) を含んでおり, 式(3)のガンマ分布の Λ (傾き) は小さくなる。雨滴粒径分布の傾きが大きい順に並べると, ほぼ降雨強度の小さい順になる。しかし降雨強度が 10 mm/h 以下であるが, 粒径が 4 mm の大きい雨

滴を含む、粒径分布の傾きが小さくなる場合もある。このように降雨強度と雨滴粒径分布の関係がすべての降雨に対して一律には成立しておらず、雨滴粒径分布を降雨強度だけで分類することは困難であり降雨タイプについても調べる必要がある。

また、Fig. 2 (梅雨前線) や Fig. 4 (低気圧) のように一時的に降雨強度が大きくなっている際の雨滴粒径分布をみると、上方に少し分かれて平行に分布している。これは降雨強度の大きい雨の影響であると考えられる。降雨強度が10 mm/h 以上の雨滴粒径分布と降雨強度が10 mm/h 以下をも含む雨滴粒径分布を Fig. 8, Fig. 9 に示す。これらの図から上方に分かれた雨滴粒径分布は、一時的な強い雨によるものであることが分かる。一方、降雨強度が10 mm/h 以上の雨滴粒径分布に着目すると、粒径1 mm 以下の4~5 階級の雨滴の数が少なくなっており、式(3) のガンマ分布の μ は正の値をとる。このように降雨タイプに関係なく降雨強度の強い (10 mm/h 以上) 時の雨滴粒径分布には特徴がある。



(a) Baiu front

(b) Typhoon

Fig. 1 Comparison between observations by optical rain gauge and tipping bucket.

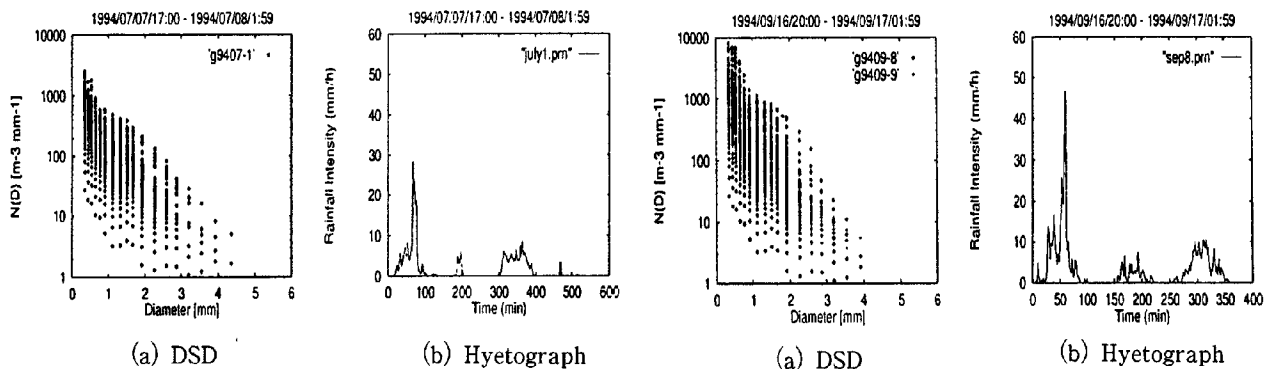


Fig. 2 (a) DSD observed by Disdrometer and (b) time series 1-minute rainfall observed by the optical rain gage (07/30/4:00, Low).

Fig. 3 (a) DSD observed by Disdrometer and (b) time series 1-minute rainfall observed by the optical rain gage (09/29/1:00, Typhoon).

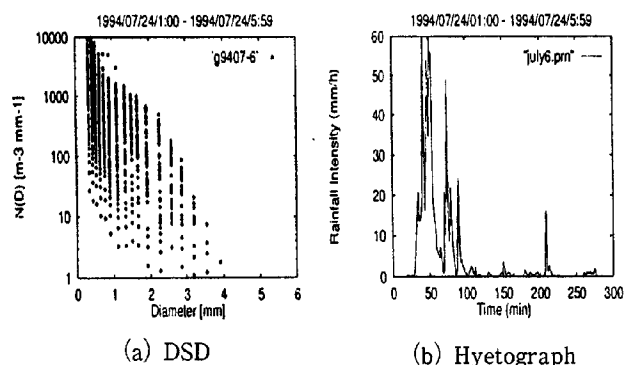


Fig. 4 (a) DSD observed by Disdrometer and (b) time series 1-minute rainfall observed by the optical rain gage (07/30/4:00, Low).

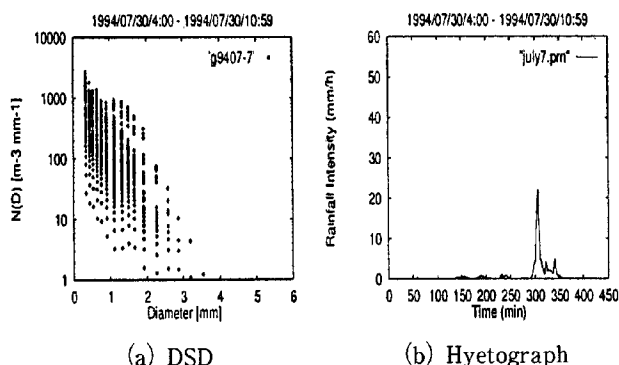


Fig. 5 (a) DSD observed by Disdrometer and (b) time series 1-minute rainfall observed by the optical rain gage (09/16/20:00, Autumn rain front).

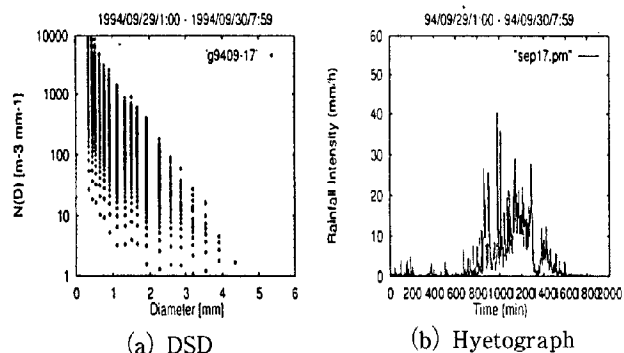


Fig. 6 (a) DSD observed by Disdrometer and (b) time series 1-minute rainfall observed by the optical rain gage (09/29/1:00, Typhoon).

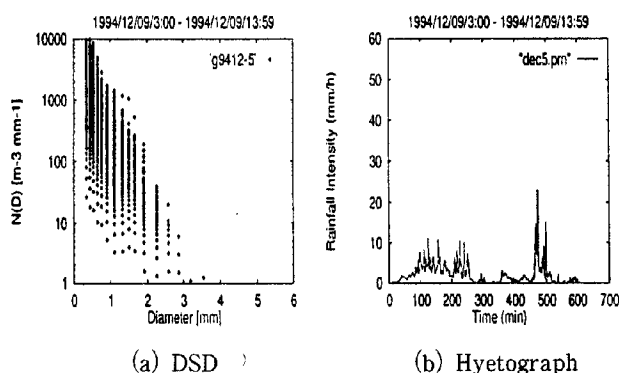


Fig. 7 (a) DSD observed by Disdrometer and (b) time series 1-minute rainfall observed by the optical rain gage (12/09/3:00, Cold front).

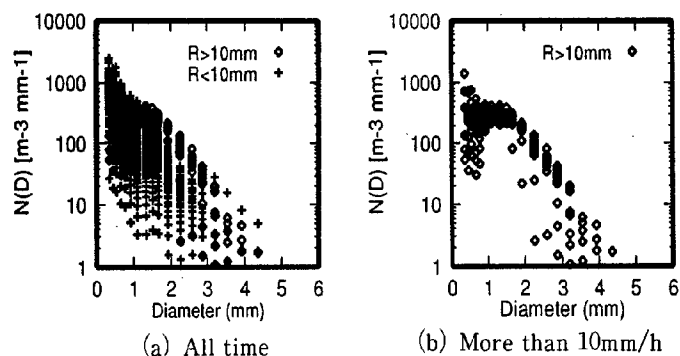


Fig. 8 DSD for all time and when rainfall intensity is more than 10mm/h (Baiu front).

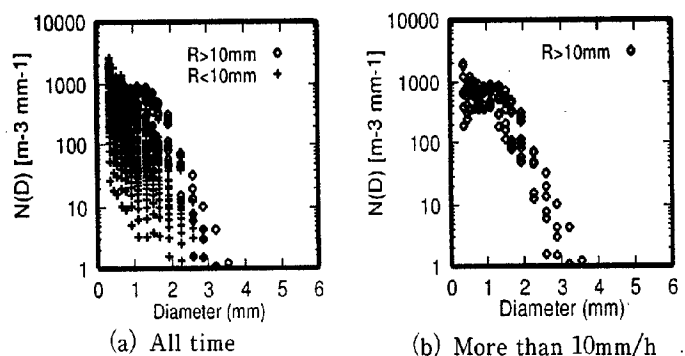


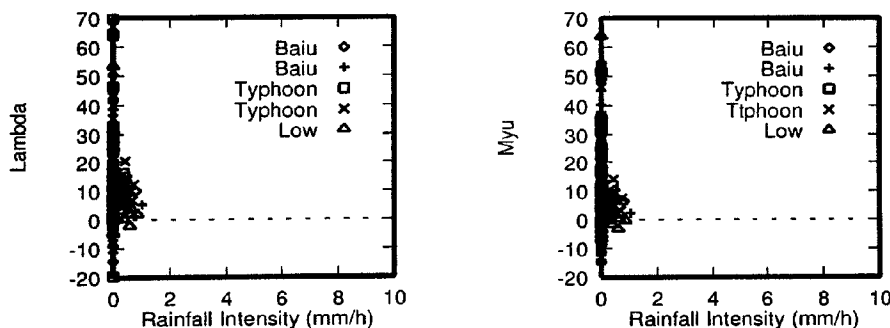
Fig. 9 DSD for all time and when rainfall intensity is more than 10mm/h (Low).

3.2.2 パラメータ同定のための蓄積時間

Disdrometer による雨滴粒径分布は1分間積算されたものであり、降雨強度は時々刻々と変化し雨滴粒径分布も変化している。同定されるパラメータが時々刻々変化する降雨の影響を受けると、その降雨タイプによる特徴を抽出するのが困難となる。そこで降雨タイプ別の特徴を抽出するために、さらにある程度のサンプル数を得るためにある程度の時間データを蓄積させてパラメータを同定する必要があると考え、蓄積時間 (IAC) を1分から15分まで1分ずつ増加させ、式(3)のパラメータ N_0 , μ , Λ を同定する。蓄積時間 (IAC) を増加させると同定されるパラメータ値が、降雨の時々刻々とした変化の影響を受けなくなり、変動が小さくなりある値に収束すると考えられる。また雨滴粒径分布についても蓄積時間 (IAC) を増加させると、各階級の雨滴個数がある値に収束し雨滴粒径分布の分布の幅が狭くなると考えられる。これらのことから各蓄積時間で同定されたパラメータ値の変動および雨滴粒径分布そのものの変動について調査する。同定されたパラメータ値の変動は、3.1で述べたように降雨タイプおよび降雨強度の影響を強く受け雨滴粒径分布の特徴を表すパラメータ μ , Λ について行う。なお、蓄積時間 (IAC) は、本研究においては瞬時性のあるレーダー観測との比較から、短いほど優れていると考える。

同定されたパラメータ Λ と降雨強度の関係を Fig. 10 (a) に、同定されたパラメータ μ と降雨強度の関係を Fig. 10 (b) に示す。なお蓄積時間は5分で、降雨強度も5分平均値である。図中の凡例の上から順に降雨タイプが梅雨前線、梅雨前線、台風接近、台風性、低気圧であり、これらの図から同定されたパラメータ Λ , μ は降雨強度が小さい時、特に降雨強度が1 mm/h 以下の時パラメータの変動が大きいことがわかる。これは、降雨強度が小さい時、すなわち雨滴がほとんど観測されていないサンプル数が少ない時にパラメータを同定しているためと考えられる。本研究ではレーダー雨量計による観測精度向上を目的としているので、解析に用いるデータに1分間平均の降雨強度が1 mm/h という下限値を設けた。すなわち、パラメータの同定については、1分間平均の降雨強度が1 mm/h 以上観測されている時の雨滴粒径分布を用いる。

次に、各雨滴粒径分布において粒径の小さい方から8番目 (粒径1.232 mm~1.429 mm), 9番目 (粒径1.429 mm~1.582 mm) の階級における雨滴の個数の最大値、最小値を求め、(最大値)-(最小値)の値の変動を調べた。蓄積時間 (IAC) による(最大値)-(最小値)の値の変動を表した図を Fig. 11 に示す。8番目、9番目の階級に着目したのは、粒径の大きい階級では雨滴の個数が少なく、蓄積時間 (IAC) による変化を確認することは困難であるからである。降雨事例によって差はあるものの、8番目、9番目の階級とも蓄積時間 (IAC) が5分で(最大値)-(最小値)の値は収束し、雨滴粒径分布の幅が変動していないことが分かる。以上を整理すると、パラメータおよび雨滴粒径分布と蓄積時間 (IAC) の関係からパラメータの同



(a) Relation between Λ and rainfall intensity

(b) Relation between μ and rainfall intensity

Fig. 10 Relations between parameters and rainfall intensity.

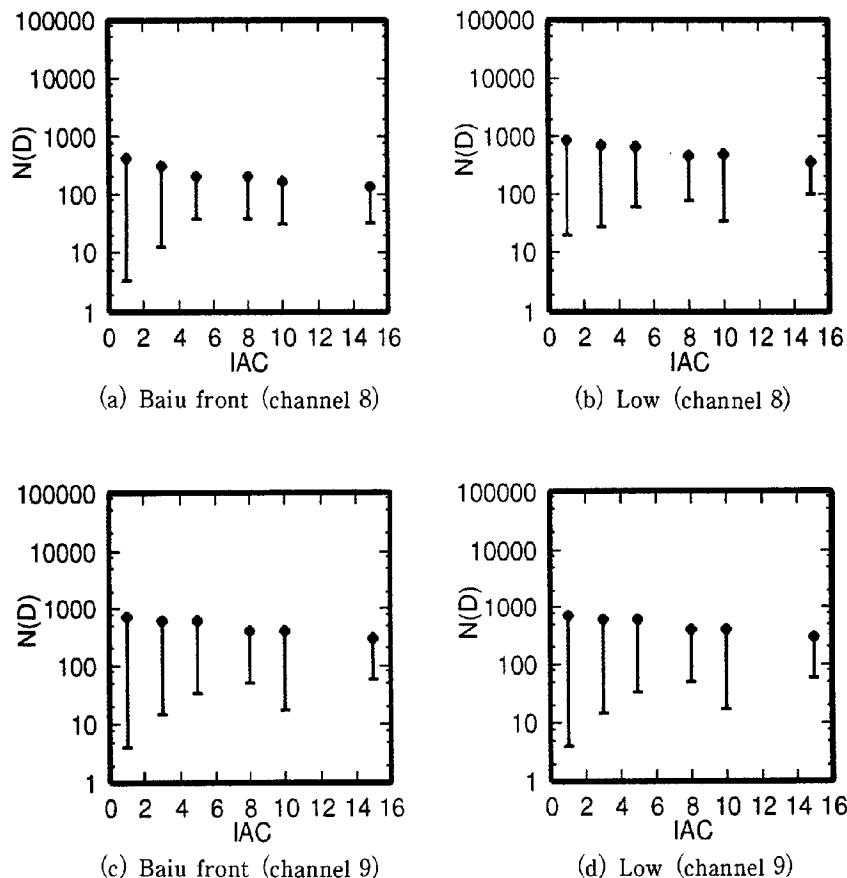


Fig. 11 Relations between the width of DSD at channel 8, 9 and accumulation time.

定に必要なデータの蓄積時間 (IAC) は 5 分であると考えられ, 3. 3 で述べる降雨タイプ別の雨滴粒径分布の定式化には蓄積時間 (IAC) を 5 分とする。

3. 3 降雨タイプ別の雨滴粒径分布の定式化

降雨タイプ別の雨滴粒径分布の定式化について述べる前に, 解析に用いる雨滴粒径分布および降雨強度について整理すると以下のようになる。

- 雨滴粒径分布は 1 分平均の降雨強度が 1 mm/h 以上の時間のものを用いる。
- 蓄積時間は 5 分とする。すなわち, 雨滴粒径分布および降雨強度は 5 分平均のものを用いる。

3. 2. 1 の Fig. 8, Fig. 9 で示したように降雨強度 10 mm/h 以上の雨滴粒径分布には特徴があることが確認され, 3. 2. 2 で示した Fig. 10 から明らかであるが降雨強度が小さい時にパラメータ値の変動が大きい。よって降雨強度 10 mm/h 以上の降雨について降雨タイプの雨滴粒径分布の定式化を考える。降雨強度が大きくなるにつれパラメータ値は, Table. 4 に示す値に収束する。しかし, 降雨強度 30 mm/h 以上でも収束値には幅があり, 雨滴粒径分布を降雨強度のパラメータだけで定式化することは困難である。降雨タイプ別の収束値も考慮する必要がある。降雨強度 15 mm/h 以上が観測されている降雨事例で同定されたパラメータの収束値を Table. 5 に示す。Table. 5 より同定されたパラメータを降雨強度と降雨タイプで分類するとパラメータの収束値の値の幅は明らかに小さくなっている。

雨滴粒径分布を定式化するためにパラメータ間の関係を調査した。パラメータ Λ と μ の関係, $\ln N_0$ と Λ の関係の一例を Fig. 12, Fig. 13 に示す。

これらの図からパラメータ Λ と μ , $\ln N_0$ と Λ の間には線形の関係が成立している。そこで各降雨についてパラメータ間の関係を

$$\Lambda = a\mu + b \quad \text{..... (5)}$$

$$\ln N_0 = c\Lambda + d \quad \text{..... (6)}$$

とする。同定されたパラメータ Λ , μ に線形の関係が成立することは経験的に知られており, パラメータ Λ , μ の異なった組み合わせでも同様のガンマ分布になることが指摘されている [10]。 $\ln N_0$ と μ , $\ln N_0$ と Λ に線形関係が成立することは本解析より導いた。もちろん線形関係は降雨タイプによって異なる。すなわち, 式(5) から 式(6) の a, b, c, d が降雨タイプによって異なる。雨滴粒径分布の定式化ではパラメータ値を収束値より定め, 各パラメータ間の線形関係を降雨タイプ別に考える。

Λ と μ の関係では, 式(5) の $\Lambda = a\mu + b$ において梅雨前線では a の値が1, 台風性で a の値は1.3~1.4 と定められる。ただし, 台風性では相関係数が0.6~0.75 と悪い。 Λ と $\ln N_0$ の関係では, 式(6) の $\ln N_0 = c\Lambda + d$ において梅雨前線では c の値が1, d の値が4.7, 台風性では c の値が0.8~1, d の値が6~7.6, 秋雨前線では c の値が1, d の値が5.3~6.5 と定められる。以上をまとめると, 収束値より定めるパラメータとしては, Λ と μ , Λ と $\ln N_0$ の関係が降雨タイプ別に考えられることから Λ を用いる。したがって式(4)において μ に式(5), $\ln N_0$ に式(6) を代入し整理すると

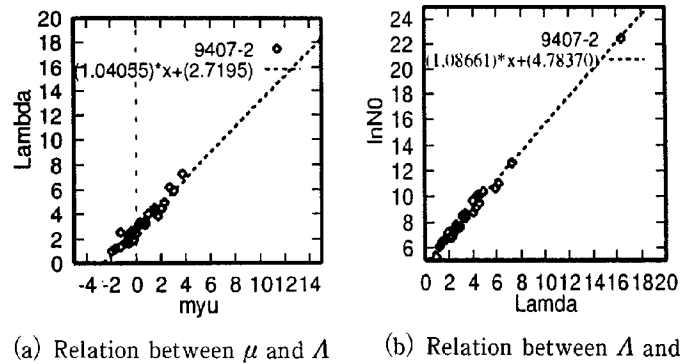


Fig. 12 Relations among parameters (07/08, Baiu front).

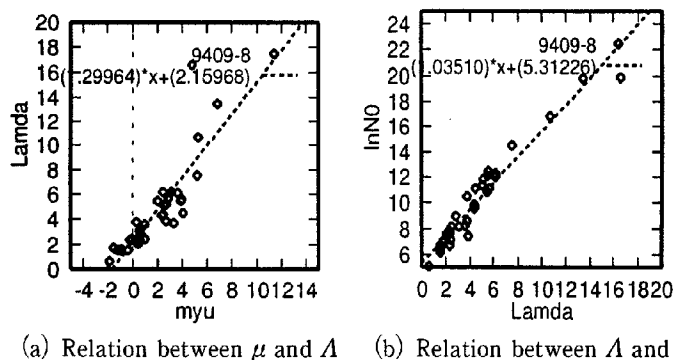


Fig. 13 Relations among parameters (94/09, Autumn rain front).

Table 4 The value of the parameter of rainfall intensity is more than 10 mm/h.

	Λ	μ	$\ln N_0$
$R \geq 10\text{mm/h}$	3~8	1.5~8	9~15
$R \geq 20\text{mm/h}$	3~6	2~7	9~13.5
$R \geq 30\text{mm/h}$	3.5~5.5	3~7	9.5~13

Table 5 Value of the parameters when rainfall intensity is more than 15 mm/h and rainfall type.

	Rainfall type	Λ	μ	$\ln N_0$
7/7	Baiu front	3~4	3~4	8~10
7/24	Typhoon	5~7	3~4	11~14
7/30	Low	5~6	3~5	11~12
8/21	Atmospheric instability	4~6	2~5	10~13
9/16(1)	Autumn rain front	4~6	2~7	9~13
9/16(2)	Autumn rain front	4~5	3~4	10~12

Table 6 Value of the parameters a, b, c, d, Λ depending on rainfall type.

Rainfall type	a	b	c	d	Λ
Baiu front	1.0	1.6~2.7	1.0	4.7	3~4
Typhoon	1.3~1.4	-0.3~3.2	0.8~1.0	6.0~7.6	4~7
Autumn rain front	0.6~1.3	2.2~3.2	1.0	5.3~6.5	4~6

$$\ln N(D) = (c\Lambda + d) + \frac{\Lambda - b}{a} \cdot \ln D - \Lambda \cdot D \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。式(7)のパラメータ a, b, c, d, Λ は **Table. 6** に示すような値が降雨タイプ別に定まる。 a, b, c, d, Λ の値は、降雨タイプによっては値に幅があるが実際のレーダー雨量計の地上雨量を推定する際には、 a, b, c, d, Λ の値を降雨タイプごとに限定する必要がある。そこで、降雨タイプ別に定めたパラメータ a, b, c, d, Λ を代入した式(7)と実際の雨滴粒径分布との比較を行い、定式化が正確であるかの精度調査を実施し、降雨タイプ別に限定したパラメータ a, b, c, d, Λ を決定する必要がある。

式(7)を用いるには、降雨タイプを判断することが必要不可欠になる。降雨タイプは天気図から判断しており、実際のレーダー雨量計に適用する際には、第4章で述べる雨滴粒径分布の鉛直構造から降雨タイプを判断し、その降雨タイプを用いる。

4. 雨滴粒径分布の鉛直構造

4.1 雨滴粒径分布の鉛直構造

観測期間中にMUレーダーによって雨滴粒径分布が観測されているのは、**Table. 2** に示す梅雨前線による降雨と台風性の降雨である。観測された雨滴粒径分布の一例を **Fig. 14**, **Fig. 15** に示す。**Fig. 14** は7月7日の梅雨前線による降雨で、**Fig. 15** は9月29日の台風性の降雨である。観測された雨滴の落下速度のドップラースペクトルから推定される雨滴粒径分布は式(3)におけるガンマ分布のパラメータ Λ, μ ,

N_0 であり、図に示したのは、高度2 km～4 kmまでの150 mごとの各高度における雨滴粒径分布である。高度2 km未満ではMUレーダーの観測モードの切り替えのために電力が安定せず雨滴の落下速度のドップラースペクトルの抽出が困難となる。また高度4 km以上ではブライトバンドが存在するために、雨滴粒径分布の推定精度が低くなるので高度2 km以上4 km以下の雨滴粒径分布を用いる。これらの図は地上の雨滴粒径分布との比較を容易にするために、Table. 3 に示した粒径20階級を用いて各階級ごとの雨滴の個数をプロットしたものである。

観測された雨滴粒径分布の鉛直分布の降雨タイプによる特徴、および高度依存性の定性的な考察を行う。Fig. 14 に示した梅雨前線による降雨の雨滴粒径分布は、粒径5 mmの大きい雨滴まで観測されているものが多いが、Fig. 15 の台風性降雨の雨滴粒径分布では、大きい粒径は観測されていない。雨滴粒径分布の鉛直分布の高度による変化は、Fig. 14 の梅雨前線による降雨では変化が大きいが、Fig. 15 の台風性降雨では緩やかである。以上のようにこの2つの降雨事例では、雨滴粒径分布の鉛直分布が大きく異なっており降雨タイプによる特徴が表れている。ただし、梅雨前線による鉛直方向の雨滴粒径分布の観測観測期間は1時間だけであるので、Fig. 14 のような鉛直方向の雨滴粒径分布の大きな変化が梅雨前線の降雨の特徴であると言及することは困難である。一方、Fig. 15 の台風性の降雨は観測期間を通しての特徴である。よって、詳細な鉛直方向の雨滴粒径分布の解析は9月29日の台風性の降雨について行う。

4.2 雨滴粒径分布の高度依存性

雨滴粒径分布の鉛直構造を定式化するために、MUレーダー観測から推定された各高度のパラメータ A ,

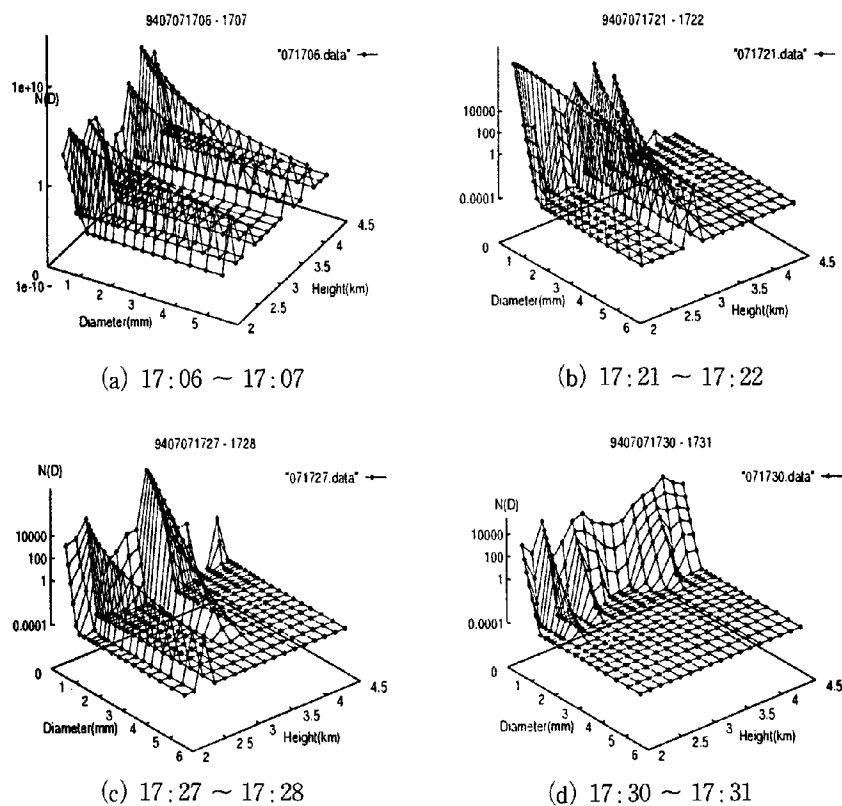


Fig. 14 Vertical profile of DSD observed by MU radar (Baiu front).

μ , N_0 の鉛直方向の関係 (以下高度依存性という) およびパラメータ間について解析を行う。

推定されるパラメータ Λ , μ , N_0 から降雨量に変換し降雨量の鉛直方向の關係に着目した降雨量の高度依存性は中北ら (1995) [3] によって詳細に議論され、降雨強度の対数の鉛直分布は第一近似的に高さ方向に線形の關係があることがわかっている。そこで、雨滴粒径分布の高度依存性を明らかにするために推定されるパラメータ Λ に着目し、 Λ を高度 H の関数で、その他のパラメータ μ , N_0 については 3.3 より各パラメータ間には線形關係が成立していることが確かめられているので、新ためて係数を同定し直し、 μ , N_0 を Λ の関数で表すと、

$$\Lambda = 0.796 \cdot H + 26.82 \quad \text{..... (8)}$$

$$\mu = 0.21 \cdot \Lambda - 5.17 \quad \text{..... (9)}$$

$$\ln N_0 = 0.54 \cdot \Lambda - 6.91 \quad \text{..... (10)}$$

のような關係が成立している。なお、以下では、これら線形關係式によるパラメータ値とドップラースペクトルから直接推定されるパラメータ値とを区別するために、後者を観測値と呼ぶことにする。さらに、パラメータの観測値から推定した降雨強度を降雨強度の観測値と呼ぶ。Fig. 16 の破線にこれら同定された線形關係式を示す。式(8)～式(10)を用いて各高度 H におけるパラメータ Λ , μ , N_0 の値を決定し、降雨量に変換すると Fig. 17 (a) の+印となる。Fig. 17 (a) より、式(8)～式(10)の關係では特に高度 2 km 以上 3 km 以下のパラメータ観測値を用いて変換した降雨量よりもかなり小さくなっており、降雨強度の高度依存性を表現することが困難であることがわかる。そこで、式(8)～式(10)でどのパラメータが高度依存性に

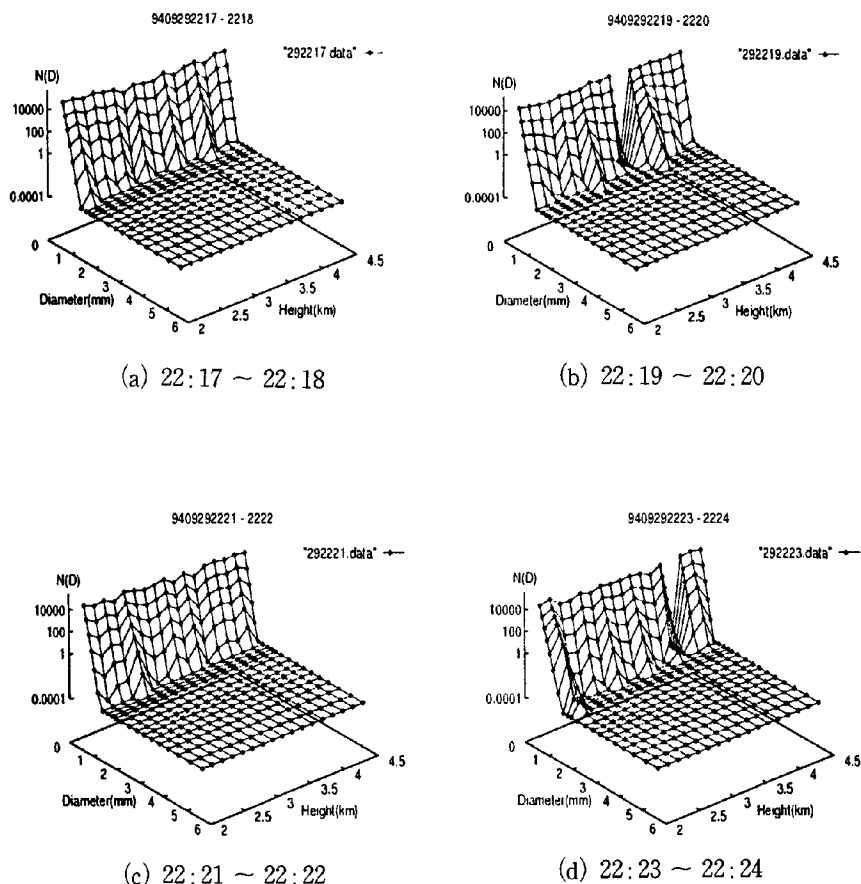


Fig. 15 Vertical profile of DSD observed by MU radar (Typhoon).

影響を与えているかを調べる。まず、パラメータ Λ の観測値を用い、 μ , N_0 は式(9)と式(10)で定まる値を用いて降雨量に変換したものを Fig. 17 (b) に示す。Fig. 17 (b) と Fig. 17 (a) を比較すると、(a)と同様に高度 2 km 以上 3 km 以下の降雨量がまだ小さくなっており、うまく表現できていない。次に、 Λ , N_0 の観測値と式(9)から得られる μ を用いて降雨量に変換したものを Fig. 17 (c) に示す。 Λ , μ の観測値と式(10)から得られる N_0 を用いて降雨量に変換したものを Fig. 17 (d) に示す。Fig. 17 (c), (d) は (a), (b) に比べると、(a), (b) でうまく表現できていなかった高度 2 km 以上 3 km 以下の降雨量は改善されているものの高度 3 km 以上で降雨量が 6 mm/h になっているものが存在するなど降雨強度の高度依存性を正確に表現しているとは言えない。

次に、 N_0 の高度依存性に着目し、 Λ と同様に解析を行う。 N_0 を高度 H の関数で、その他のパラメータ Λ , μ を N_0 関数で表すと、

$$\ln N_0 = -0.22 \cdot H + 9.72 \quad \text{..... (11)}$$

$$\Lambda = 1.73 \cdot \ln N_0 + 13.85 \quad \text{..... (12)}$$

$$\mu = 0.37 \cdot \ln N_0 - 2.38 \quad \text{..... (13)}$$

のような関係になり、式(11)～式(13)を用いてパラメータ Λ , μ , N_0 の値を決定し、降雨量に変換すると Fig. 18 (a) となる。Fig. 17 (a) に比べると、低高度の降雨量が上空の降雨量よりも大きくなっており、 Λ を高度 H の関係で表すよりも N_0 を高度 H の関係で表す方が雨滴粒径分布の高度依存性を表すのに適して

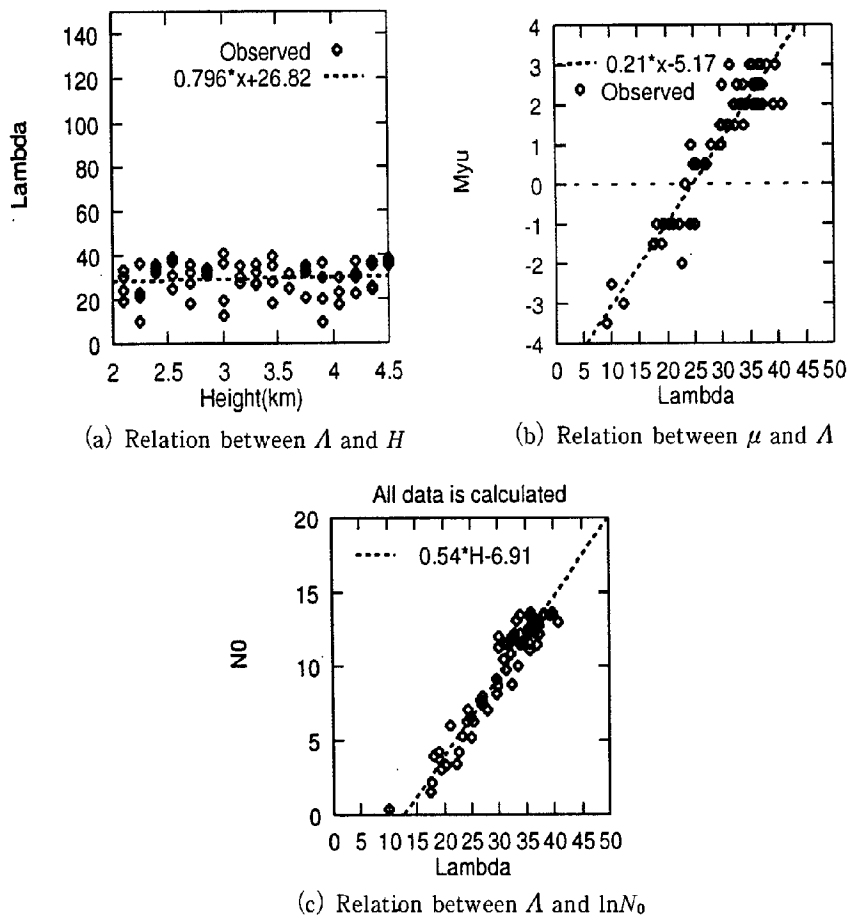


Fig. 16 Regression lines with the height dependencies of Λ and relationships among parameters.

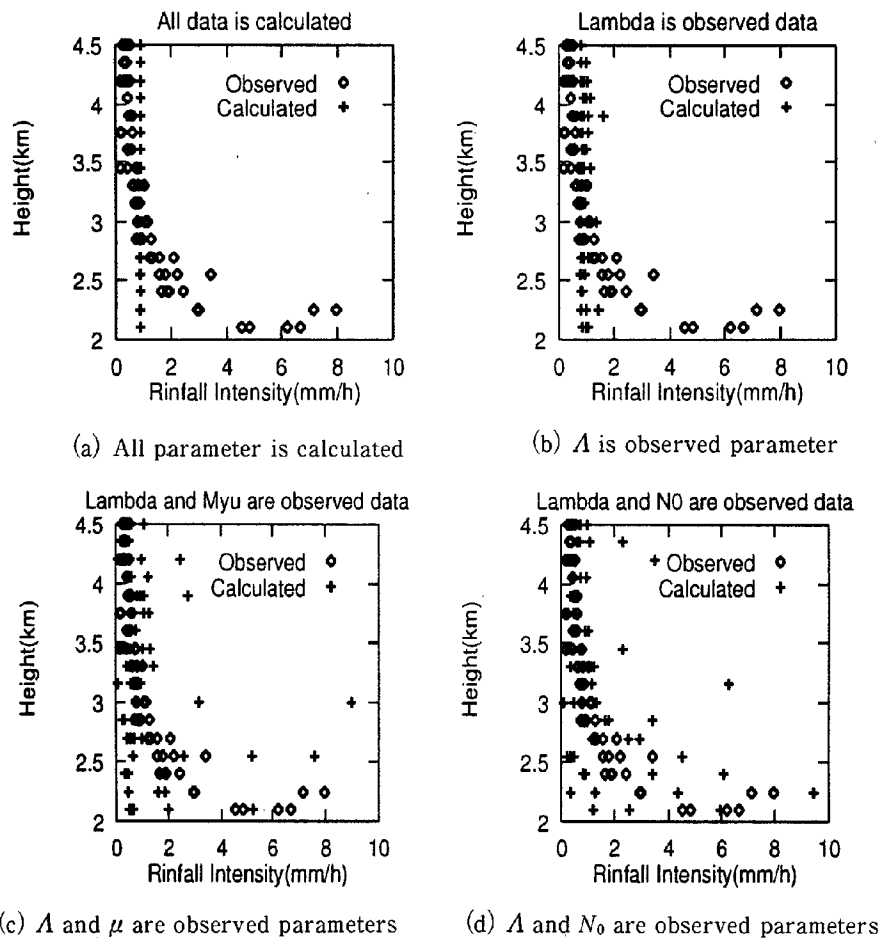


Fig. 17 Influences of parameters on the rainfall.

いる。しかし、高度 2 km 以上 3 km 以下の降雨量はやはり、パラメータの観測値を用いた推定した降雨量より小さくなっており、うまく表現できていないことがわかる。そこで、やはり Λ の場合と同様にまず、パラメータ N_0 に観測値を用い、 Λ 、 μ には式(12)と式(13)で定まる値を用いて降雨量に変換したものを Fig. 18 (b) に示す。Fig. 18 (b) と Fig. 18 (a) を比較すると、(a) と同様に高度 2 km 以上 3 km 以下の降雨量が観測値より小さくなっており、うまく表現できていないことがわかる。次に、 N_0 、 Λ を推定された値と μ を式(13)で降雨量に変換したものを Fig. 18 (c) を示す。 N_0 、 μ を推定された値と Λ を式(12)で降雨量に変換したものを Fig. 18 (d) を示す。Fig. 18 (c), (d) と Fig. 17 (c), (d) を比較すると、 Λ の時に高度 3 km 以上で降雨量が 6 mm/h になっているのが改善されているが、高度 4 km 以上で降雨量が上下に比べて大きくなっている。

降雨量が上空で大きくなっているパラメータに着目するとパラメータ μ の値が負の値の場合で、パラメータ N_0 を高度 H の関数で表すときも Fig. 19 にあるようにこの例では、 N_0 が 1000 以下の値を回帰分析する場合に取り除くと N_0 の高度依存性がうまく表現できると考えられる。しかも、この例では、 N_0 が 1000 以下の他のパラメータ μ の値も負の値になっている。ただし、Fig. 19 に示していない他の 3 時点に関しては、除外すべきパラメータ観測値は、必ずしも N_0 が 1000 以下、 μ の値が負という条件を満たすものではない。したがって、除外すべきパラメータ観測値は、高度依存性からみて主観的に判断して選択した。最終的に実利用手法とするためには、客観的な除去方法を開発する必要があるが、本論文では除外したもの

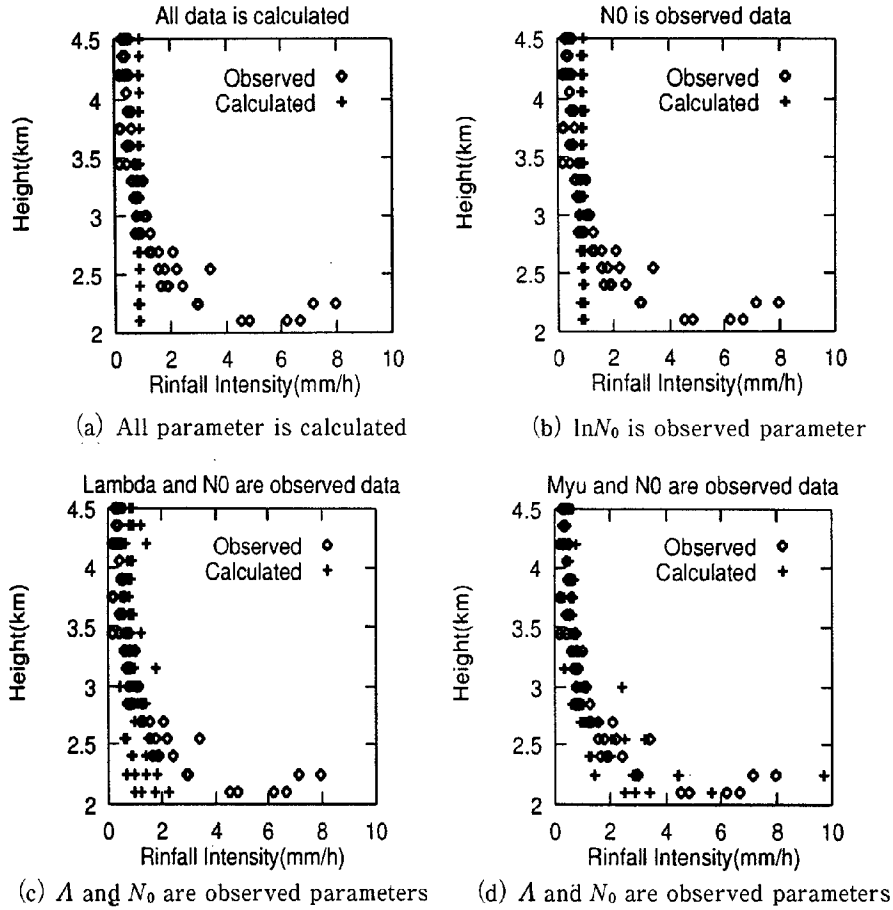


Fig. 18 Influences of parameters on the rainfall.

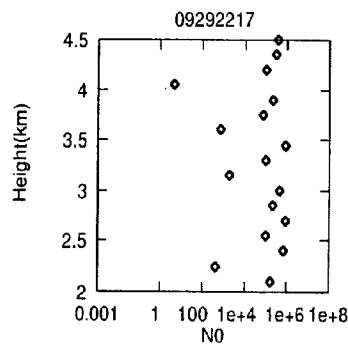


Fig. 19 Relation between N_0 and height.

を異常値とみなすことにより、パラメータ間の関係を見いだせるかをまず明らかにすることを目的とする。

そこで、除外した残りのパラメータ観測値を用いて、 N_0 を高度 H の関数で、その他のパラメータ Λ 、 μ を N_0 の関数で表すことを試みる。同定された関係は

$$\ln N_0 = -1.04 \cdot H + 14.75 \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\Lambda = 1.61 \cdot \ln N_0 + 15.19 \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\mu = 0.29 \cdot \ln N_0 - 1.24 \quad \dots\dots\dots (16)$$

であり, Fig. 20 に図示する。式(14)~式(16)を用いてパラメータ Λ , μ , N_0 の値を決定し, 降雨量に変換すると Fig. 21 (a) となる。Fig. 21 (a) は Fig. 18 (a) に比べると, 最低高度の降雨量が上空の降雨量よりも大きくなっている。しかし, 高度 2 km 以上 3 km 以下の降雨量が観測値と比較してやはり小さくなっており, うまく表現できていないことがわかる。そこで, 次にパラメータ N_0 として推定された値そのものを用い, Λ , μ は式(15)と式(16)で降雨量に変換したものを Fig. 21 (b) に示す。Fig. 21 (b) と Fig. 18 (b) を比較すると, (a) と同様に高度 2 km 以上 3 km 以下で降雨量のばらつきが出てきているものの観測値と比較して小さい。次に, N_0 , Λ に観測値を, μ に式(16)で定まるものを用いて降雨量に変換したものを Fig. 21 (c) を示す。 N_0 , μ を推定された値と Λ を式(15)で降雨量に変換したものを Fig. 21 (d) を示す。Fig. 21 (c), (d) と Fig. 18 (c), (d) を比較すると, 高度 4 km 以上で降雨量が上下の降雨量に比べて大きくなっていたのが改善されている。これは, パラメータの観測値の異常値そのものを除去することによって改善され, 異常値を除去した残りのパラメータ観測値を用いて関係式を定式化することにより, 関係式が高度依存性をより正確に表現するように改善されたためであると考えられる。よって, N_0 を高度 H の関数で表現し, 雨滴粒径分布の高度依存性を明らかにするためには異常なパラメータ観測値を除去した場合の方が良いことがわかる。

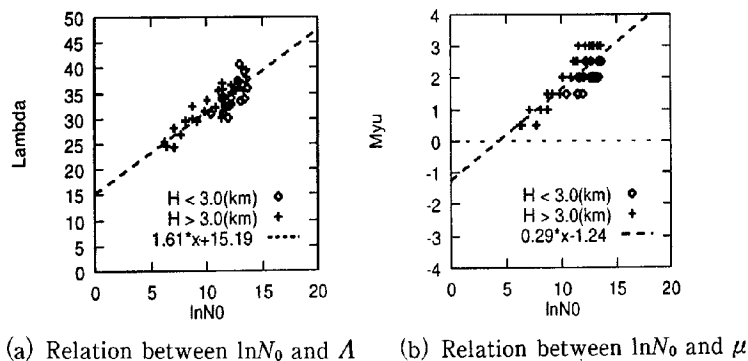


Fig. 20 Relations between two parameters.

以上, 雨滴粒径分布の高度依存性を明らかにするためにパラメータ Λ および N_0 を高度 H の関数で, その他のパラメータを Λ および N_0 の関数で表現しようと試みた。しかし, 全高度に関して一律の関係式を定式化することは困難であることがわかった。異常なパラメータ観測値を除去した場合, パラメータ N_0 , μ に観測値を用い, Λ を N_0 の関数で表した場合が高度依存性が最も良く再現できている。たとえば, パラメータ Λ , μ の高度が 3 km 以上と 3 km 以下の Λ と N_0 , μ と N_0 とそれぞれの関係を別々にみると, Fig. 20 (a), (b) となっており, 関係式が高度に依存していることがわかる。よって, 一律の関係式を定式化するために関係式を少なくとも高度が 3 km 以上と 3 km 以下で異なるものを用いる必要がある。一方, 異常なパラメータ観測値は異常値とし除去した。しかし, パラメータ Λ , μ , N_0 の組み合わせが異なっても同じ雨滴粒径分布となることが Sato et al. [9] で述べられており, 異常値として除去した観測パラメータを, 異常値でないものに変換して有効に活用できる可能性が残されている。

4. 3 雨滴粒径分布の鉛直構造の利用可能性

本研究で用いた雨滴粒径分布の鉛直分布の観測データは, 梅雨前線と台風性の 2 つの事例のみであった。特に梅雨前線の降雨の観測期間は 1 時間であったために雨滴粒径分布の高度依存性についての解析は台風性

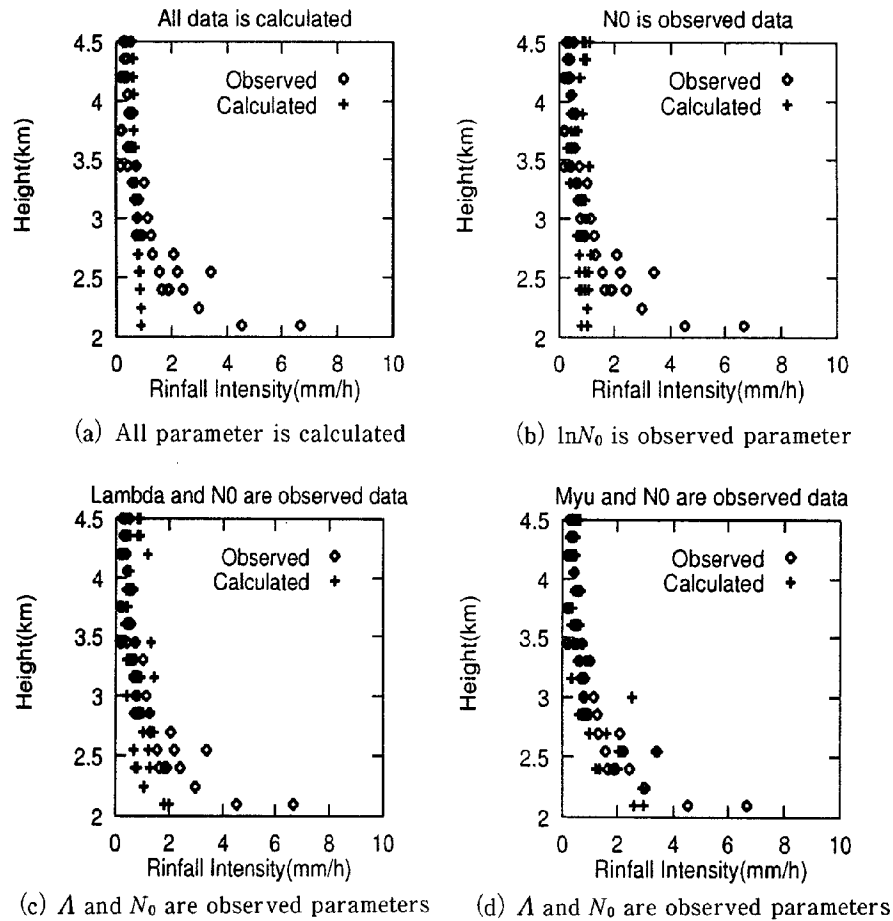


Fig. 21 Influences of parameters which are expected from the unusual values on the rainfall.

の降雨のみとなった。4.1で示したように定性的には降雨タイプによって雨滴粒径分布は異なっていることは確かであり、4.2で示したように雨滴粒径分布の高度依存性を定式化することが可能であると考えられる。今後は観測事例をさらに増やして、梅雨前線などの降雨タイプに対しても解析を行う。さらに、今回降雨タイプを台風性、梅雨前線など大スケールでの現象で分類したが、さらに小スケールで見ることにより、降雨を対流性、層状性などで分類する必要があるとも考える。これについては、MUレーダー観測時にレーダー雨量計および船舶用のレーダーによる同期観測を行い、レーダー情報より小スケールで降雨タイプを分類し、降雨タイプ別の雨滴粒径分布の鉛直構造を定式化する方向が考えられる。なお、MUレーダーによる雨滴粒径分布の鉛直分布の観測では、高度2 km以上のデータでありその高度以下における雨滴の成長過程を調べることができなかった。しかし、京都大学超高層電波研究センターで開発された境界層レーダー [9] では高度約400 mからの観測が可能であり、MUレーダーとの同期観測によって雨滴粒径分布の鉛直分布の関係をより詳細に解析することによって地上の雨滴粒径分布との関係も明らかにできると考える。さらに、実際のレーダー雨量観測に適用する際には雨滴粒径分布の鉛直分布より降雨タイプを判断し、地上と上空の雨滴粒径分布の比較から降雨の鉛直構造を明らかにすることで、レーダー雨量計による地上雨量推定精度向上につながると考える。

5. 結 論

以上、本論文で述べた内容をまとめると以下ようになる。

地上同期観測で観測された雨滴粒径分布の解析結果を示し、雨滴粒径分布をガンマ分布；

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\Lambda D)$$

で近似し、パラメータ同定を行い、同定したパラメータ N_0 , μ , Λ のうち降雨タイプおよび降雨強度の影響を受け雨滴粒径分布の特徴を表すパラメータは、 μ , Λ であることを明らかにした。降雨タイプおよび降雨強度による雨滴粒径分布の定式化を行うために、まず、

- 雨滴粒径分布と降雨強度の定性的な調査。
- 降雨タイプと雨滴粒径分布の定性的な調査。
- パラメータ同定に必要なデータの蓄積時間。

について解析を行い、降雨タイプおよび降雨強度による雨滴粒径分布の定式化が可能であることを示した。特に降雨強度が 10 mm/h 以上の雨滴粒径分布には特徴があることを明らかにするとともに、降雨タイプ別にも雨滴粒径分布に特徴があり、パラメータ同定に必要なデータの蓄積時間は、5 分であることも明らかにした。さらに、以上の解析から得られた知見を用いて、降雨強度が 15 mm/h 以上で降雨タイプが梅雨前線、台風性、秋雨前線の雨滴粒径分布が

$$\ln N(D) = (c\Lambda + d) + \frac{\Lambda - b}{a} \cdot \ln D - \Lambda \cdot D$$

によって新たに定式化できること、パラメータ a, b, c, d, Λ の値は降雨タイプ別に定まることを明らかにした。しかし、パラメータ値は降雨タイプによっては値に幅があり、実際にレーダー雨量を推定するにはこの定式化の精度調査を実施しなければならない。

MU レーダーで観測された雨滴粒径分布の鉛直分布の解析を、降雨タイプが梅雨前線、台風性の 2 事例しかないため、定行的に行った。その結果を以下に示す。

- 梅雨前線による降雨では雨滴粒径分布の鉛直方向の変化は緩やかであるが、台風性の降雨では大きい。
- 梅雨前線による降雨では粒径の大きい雨滴（粒径 3 mm～5 mm）を含む分布が多かったが、台風性の降雨では小さい雨滴（粒径 1.6 mm 以下）が多い。

雨滴粒径分布の高度依存性については、MU レーダーで観測された各高度の雨滴の落下速度のドップラースペクトルから推定されるパラメータ N_0 を高度 H の関数で、その他のパラメータ Λ および μ を N_0 の関数で定式化を行った。その際に、 μ の値が負の値のパラメータの組み合わせを除去することにより雨滴粒径分布の高度依存性がより精度良く表現でき、パラメータ Λ および μ と N_0 の関係式が高度依存性があり、少なくとも高度 3 km 以上と 3 km 以下に対する 2 つの関係式を用いることで雨滴粒径分布の高度依存性を関係式で表すことが可能になり、雨滴粒径分布の鉛直構造を定式化することが可能であることを示した。

参 考 文 献

- 1) 北川 明・小野寺 直・杉浦幸彦ら：レーダー雨量計の雨量観測手法の統一による精度向上，河川情報研究，No.2, pp.65-74, 1994.
- 2) 竹村公太郎・西原 功・吉本隆明・村尾浩太・児島富士夫：10 分間のテレメータ雨量によるレーダーの実時間補正法の研究，河川情報研究，No.3, pp.1-6, 1995.
- 3) 中北英一・中川勝広・池淵周一・佐藤 亨・Baxter E. Vieux・高棹琢馬：雨滴粒径分布の鉛直プロフィールを利用したレーダー雨量推定手法の構築，京都大学防災研究所年報第 38 号 B-2, 1995.
- 4) Nakakita, E., Ikebuchi, S., Nakagawa, K., Sato, T., B. E. Vieux and Takasao, T.: Utilization of Ver-

- tical of DSD into Building up an Algorithm for Estimating Ground Rainfall Amount Using Radar, Proc. of the III International Symposium of Hydrological Application of Weather Radar, pp.375-384, 1995.
- 5) 中川勝広・中北英一・池淵周一・佐藤 亨：雨滴粒径分布の鉛直プロファイルを考慮したレーダー雨量推定手法の構築，平成7年度関西支部年次学術講演会概要集，1995.
 - 6) 中川勝広・中北英一・池淵周一・佐藤 亨・Baxter E. Vieux：降雨の鉛直プロファイルを考慮したレーダー雨量推定手法の構築，土木学会第50回年次学術講演会概要集，1995.
 - 7) 中川勝広・中北英一・池淵周一・佐藤 亨・Baxter E. Vieux・高埴琢馬：降雨の3次元構造を考慮したレーダー雨量推定手法の構築，土木学会水理講演会，1996.
 - 8) Fukao, S., Wakasugi, T. Sato, T. Tsuda, I. Hirota, I. Kimura and S. Kato：Direct Measurement of Air and Precipitation by Very Hight Frequency Dopplar Radar, Nature, Vol.316, No.6030, pp.712-714, 1985.
 - 9) Sato, T., Doji, Iwai and Kimura：Computer processing for deriving dropsiz distribution and vertical air velocities from VHF Doppler rader spectra, Radio Science, Vol.25, No.5, pp.961-973, 1990.
 - 10) 寺岡俊浩，佐藤 亨，木村磐根，橋口浩之，深尾昌一郎：MU レーダーと境界層レーダーによる降雨粒径分布の二周波同時観測，信学技報，pp.73-80, 1993.
 - 11) Marshall, J. S. and W. M. Palmer：The Distribution of Raindrops with Size., J. Meteor., 5, pp.165-166, 1948.
 - 12) Atlas, D., D. Rosenfield and D. Short：Path - and area-integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1-3cm band., J. Appl. Meteor., 16, pp.1322-1331, 1977.
 - 13) Gunn, R, and G. D. Kinzer：The ermial Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air, J. Meteorol., Vol.6, pp.243-248, 1949.