

降雨成因を考慮した雨滴粒径分布の鉛直構造解析

中川勝広*・中北英一・佐藤 亨*・池淵周一

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

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が推定可能なMUレーダーと地上同期観測を実施し、降雨タイプを考慮した地上の雨滴粒径分布の定式化を行い、時々刻々変化する時・空間スケールにおける雨滴粒径分布の鉛直分布に着目し、レーダー雨量計で分類した降雨タイプごとの雨滴粒径分布の鉛直構造を明らかにした。さらに、降雨タイプに依存した雨滴粒径分布パラメータの鉛直方向の関係の定式化を行った。

キーワード：雨滴粒径分布、鉛直構造、降雨成因、MUレーダー

1. 序論

レーダー雨量計の有効性については様々なところで議論されている(中北, 1992)。しかし、レーダー雨量計を用いて地上における降雨強度や総降雨量の推定を行う際の様々な問題があり、十分な精度が得られていないのが現状である(Krajewski, 1993; Doviak et al., 1984)。その原因の一つとして、雨滴粒径分布が降雨の種類によって変化し、その鉛直分布も変化することがあげられる。落下する雨滴粒径分布の変化を雨滴の分裂・併合・蒸発などの微物理過程を考慮したモデルで表現したり(Hardy, 1963; Srivastave, 1971)、指数分布で雨滴粒径分布を表現し(Marshall et al., 1948)、その分布の傾きを降雨強度によって分類するなどの試みは行われている(Hodson, 1986)。しかし、それらの結果とレーダー雨量推定精度向上とは必ずしも結びついていない

著者らはこれらの問題を根本的に解決するために降雨タイプに依存した形で雨滴粒径分布の鉛直構造を考慮したレーダー雨量推定手法の構築を目指している。本論文では、実際に地上と雨滴粒径分布の鉛直プロファイルを観測・解析することにより降雨タイプごとの雨滴粒径分布そのものの鉛直構造の特徴を明らかにし、雨滴粒径分布パラメータの鉛直分

布を定式化することを試みた。雨滴粒径分布の鉛直プロファイルの観測は、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ことが可能な京都大学超高層電波研究センターのMUレーダー(Middle and Upper Radar)を用いて行った。

2. 雨滴粒径分布の観測

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することができるMUレーダー(Middle and Upper Radar)を用いて雨滴粒径分布の鉛直分布の観測を実施した。観測項目は以下のとおりである。

- Disdrometerによる雨滴粒径分布の観測。
- 光学式雨量計による降雨強度の観測。
- 転倒マス式雨量計による降雨強度の観測。
- MUレーダーによる大気の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。

Disdrometer, 光学式雨量計の観測精度については、中川ら(1996)で詳細に議論されている。

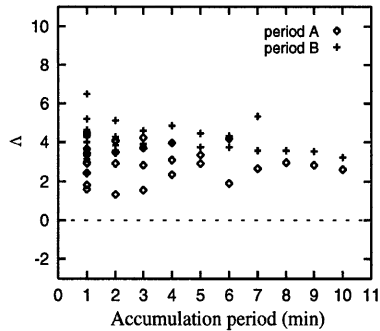


Fig. 1 Relationship between the scattering of parameter Δ and the accumulation period.

2.1 雨滴粒径分布パラメータの推定精度

(1) 雨滴粒径分布

MU レーダーで観測された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する手法については、Nakakita et. al (1995), 中川ら (1996) で述べられているのでここでは省略する。観測される地上および雨滴粒径分布の鉛直プロファイルは、ガンマ分布；

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\Lambda D) \quad (1)$$

で近似し、雨滴粒径分布パラメータ N_0, μ, Λ が推定される。以下、推定される雨滴粒径分布パラメータの推定精度について述べる。

(2) MU レーダーによるパラメータ推定精度

MU レーダーで推定される雨滴粒径分布パラメータの推定精度について寺岡・佐藤ら (1993) が詳細に議論している。その内容について以下に述べる。

雨滴粒径分布をガンマ分布として推定する場合、ガンマ分布ではパラメータ μ, Λ が相関を持つため、スペクトルの形状がほとんど同じであるが真値とは異なるパラメータが推定されることがある。推定誤差を統計的に調べるためにシミュレーションを行っている。観測されるスペクトルが統計的なゆらぎを持つので、シミュレーションでは、ある真値のパラメータ (μ_0, Λ_0) がわかっているスペクトルに対して統計的な揺らぎをモデルスペクトルにおいて実現させ、そのモデルスペクトルに対して推定を行い、その推定誤差について調べている。その結果、サンプル数 100 に対して推定誤差の関係は

$$\Lambda - \Lambda_0 = 8(\mu - \mu_0) \quad (2)$$

となり推定されるパラメータが線形関係になる。ここで、 μ, Λ は推定値である。しかし、式 (2) より新しいパラメータ；

$$\Lambda' = \Lambda - 8\mu = \Lambda_0 - 8\mu_0 \quad (3)$$

を定義することによって Λ' は一意的に定まる。 Λ の推定誤差は ± 20 程度あり、 Λ' の推定誤差は ± 3 程度に改善される。 Λ' の物理的な意味としては、 $\mu = 0$ とした場合に推定される雨滴粒径分布は指数分布の傾きを表している。したがって、ある降雨について μ, Λ などのパラメータを個別に議論する場合にはこれらのある程度の時間・空間について平均し統計的に扱う必要があり、1つの降雨スペクトルに対して議論する場合には Λ' を用いる必要があると結論づけている。雨滴粒径分布の鉛直構造解析に用いる雨滴粒径分布パラメータを時々刻々変化する降雨スケールで追跡するための解析方法については、4.1 で詳細に述べる。

(3) 地上におけるパラメータ推定精度

Disdrometer RD69 で観測された地上における雨滴粒径分布について、式 (1) のガンマ分布で推定を行うが、先と同様に雨滴粒径分布パラメータの推定誤差について述べる。地上で観測される雨滴粒径分布は 1 分間の積分値で得られるので、1 分ごとに積分期間を変化させたときの推定されるパラメータ Λ の値のばらつきを調べた。ある 2 時刻 (period A, period B) における積分期間を 1 分から 10 分に変化させた時に推定されるパラメータ Λ の値を Fig. 1 に示す。この図から積分期間が短いと Λ の値はばらついており統計的なゆらぎの影響を受け推定誤差が大きくなる。しかし、積分期間を長くすると (5 分程度) Λ の値はある値に収束していき推定誤差が小さくなっていることがわかる。図には示さないが、他の時間についても同様のことが言える。これらのことから判断すると、積分期間が 5 分程度あれば統計的なゆらぎの影響を受けなくなり、雨滴粒径分布パラメータを精度良く推定できると考えられる。よって、解

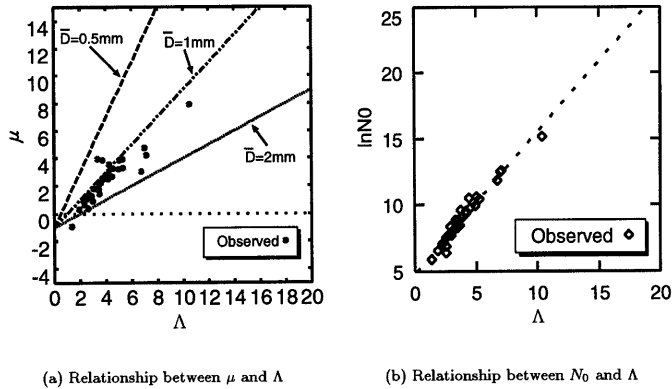


Fig. 2 Relationships among parameters for the Baiu front-caused rainfall.

Table 1 Value(s) of the parameters $\bar{D}$, a , b and Λ based on rainfall type

Rainfall Type	Number of observed hours	$\bar{D}$	a	b	Λ
Baiu front	14	1.3 ~ 1.5	1.0	4.7	3~4
Typhoon	9	0.95~1.4	0.8~1.0	6.0~7.6	4~7
Akisame front	19	0.7~1.7	1.0	5.3~6.5	4~6

析には積分期間を5分で推定した雨滴粒径分布パラメータを用いる。

3. 地上における雨滴粒径分布

地上における雨滴粒径分布パラメータの推定精度を考慮し、積分期間が5分で推定される雨滴粒径分布パラメータ N_0 , μ , Λ に着目する。降雨タイプによるパラメータ間の関係を解析することにより、降雨タイプに依存した雨滴粒径分布を定式化することを試みた。

3.1 雨滴粒径分布パラメータ間の関係

パラメータ μ と Λ の関係は、雨滴粒径分布を式(1)のガンマ分布で近似することにより、

$$\bar{D} = \frac{\int_0^\infty DN(D)dD}{\int_0^\infty N(D)dD} = \frac{\mu+1}{\Lambda} \quad (4)$$

の関係が成立している。よって、パラメータ μ と Λ の関係は、

$$\mu = \bar{D}\Lambda - 1 \quad (5)$$

となる。ここで、 $\bar{D}$ は雨滴粒径分布としての平均粒径 [mm] である。この関係は雨滴粒径分布を式(1)

で近似する際には常に成り立っていない。観測された梅雨性の降雨にともなう雨滴粒径分布のパラメータ μ と Λ の関係を、Fig. 2(a) に示す。図中の直線は、平均粒径 $\bar{D}$ が 0.5mm, 1mm, 2mm の時の雨滴粒径分布のパラメータ μ と Λ の関係を表している。この図から観測値がほぼ直線上に並んでおりその直線の傾きすなわち、式(5)中の $\bar{D}$ を同定することは可能であることがわかる。

パラメータ N_0 と Λ の関係に着目すると、観測された梅雨性の降雨にともなう雨滴粒径分布のパラメータの関係は Fig. 2(b) となる。この図から、パラメータ N_0 と Λ は線形の関係があり、

$$\ln N_0 = a\Lambda + b \quad (6)$$

と表すことができる。図には示していないが他の降雨タイプの雨滴粒径分布パラメータの関係についても式(5)、(6)で表すことが可能である。

3.2 降雨タイプを考慮した地上雨滴粒径分布の定式化

式(5)と式(6)を式(1)に代入し整理をすると、

$$\ln N(D) = (a\Lambda + b) + (\bar{D}\Lambda - 1)\ln D - \Lambda D \quad (7)$$

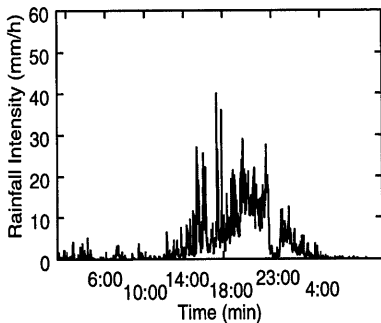


Fig. 3 Hyetograph.

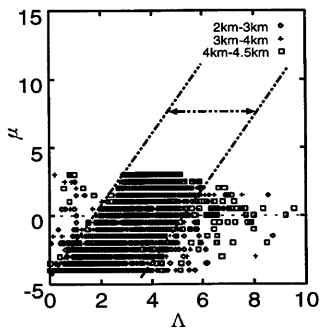
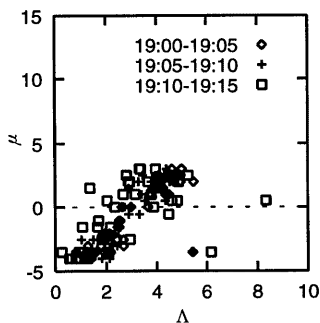
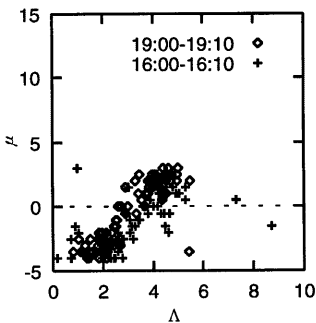


Fig. 4 Relationship between μ and Λ .



(a) Relationship between μ and Λ for 15 minutes period



(b) Relationship between μ and Λ for two different 10 minutes period

Fig. 5 Relationship between μ and Λ

となり、式中のパラメータは降雨タイプに依存して Table 1 に示す値になる。ただし、表中の値は降雨強度が 15mm/h 以上の場合である。Table 1 の D の値に着目すると、降雨タイプが梅雨性の場合、その変化は小さいが、台風や秋雨前線では大きくなっている。これは、梅雨性の降雨では降雨期間中により小さい時・空間スケールの降雨タイプがあまり変化していないことを表しており、台風性や秋雨前線では、より小さい時・空間スケールで降雨タイプが変化していることがわかる。よって、降雨タイプに依存した雨滴粒径分布の定式化には今回行った前線性や台風性などの降雨スケールではなく、より小さい時・空間スケールの降雨タイプ（例えば、対流性・層

状性など）による分類で行う必要がある。

なお、前線性や台風性などの相関場での降雨タイプと区別するために、相関場での降雨タイプより小さい時・空間スケールの降雨タイプを降雨成因と呼ぶ。

4. 雨滴粒径分布の鉛直構造

雨滴粒径分布の鉛直プロファイルの解析には、MU レーダーによって観測される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を用いる。解析に用いたデータは、1994 年の台風 26 号にともなう降雨である。地上の光学式雨量計で観測

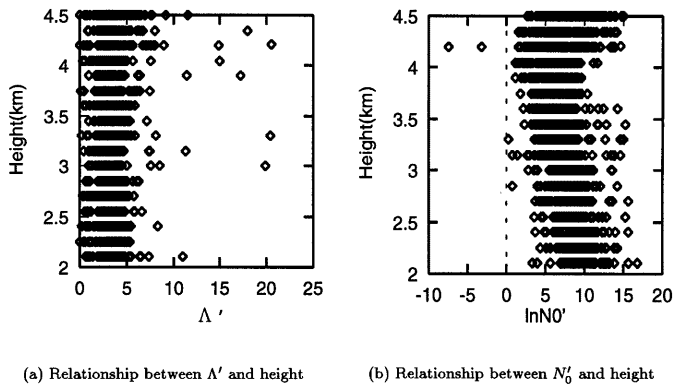


Fig. 6 Vertical profile of Λ' and N_0' (18:00~23:00).

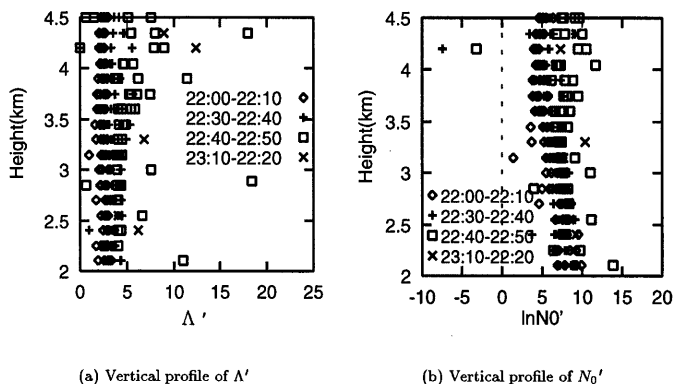


Fig. 7 Vertical profile of Λ' and N_0' .

した降雨強度のハイトグラフをFig. 3に示す。解析対象期間はFig. 3で一連の降雨が観測されている14時から23時間の9時間とした。

4.1 解析方法

解析対象全期間のガンマ分布で推定された雨滴粒径分布パラメータ μ と Λ をFig. 4に示す。この図から、降雨期間中に直線の傾きは一定であるが式(3)の Λ' (図中では $\mu=0$ の時の Λ の値)が変化しているように思われる。直線の傾きが一定であるかまた、傾きが一定であるならどの程度の期間で Λ' が変化

しているのかを調べるために19:00から19:15の15分間のパラメータ μ と Λ について調べた(Fig. 5(a)参照)。この図から始めの10分間(19:00~19:10)と後の5分間(19:10~19:15)では、パラメータ μ と Λ の直線関係が異なっていることがわかる。すなわち、10分間程度で Λ' の値が変化している。異なる2時刻(16:00~16:10, 19:00~19:10)の10分間のパラメータ μ と Λ についても同様のことが言える(Fig. 5(b)参照)。したがって、 Λ' の時系列変化を見ることは可能であり Λ' を再定義し、その時系列・鉛直変

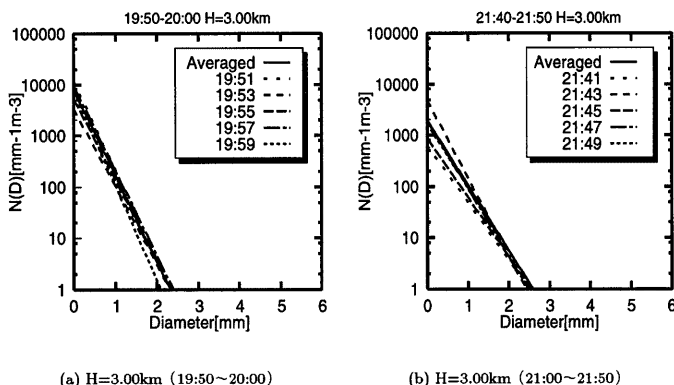


Fig. 8 Influence on the rain drop size distribution.

化を解析すれば良いが、 Λ' の物理的な意味としては指数分布の傾きであるので、以降の解析については式(1)の $\mu=0$ (指数分布)で推定される雨滴粒径分布パラメータで行う。ガンマ分布で推定されたパラメータと区別するために指数分布で推定されるパラメータを Λ', N'_0 とする。すなわち、地上サンプルは積分値であったので5分程度で十分であったが、レーダー観測は瞬時値であるので、10分では、やはり μ, Λ としての議論はサンプル数の小ささからできないので Λ' で議論する。

降雨タイプに依存した雨滴粒径分布の高度依存性を調べるために雨滴粒径分布を指数分布(すなわち、式(1)の $\mu=0$)で推定した雨滴粒径分布パラメータ Λ', N'_0 の鉛直分布に着目する。解析対象全期間のパラメータ Λ', N'_0 の鉛直分布をFig. 6に示す。Fig. 6(a)はパラメータ Λ' の鉛直分布で、Fig. 6(b)はパラメータ $\ln N'_0$ の鉛直分布である。これらの図からそれぞれのパラメータの変化に幅があり、台風性の降雨の雨滴粒径分布の高度依存性を一律に定めることは困難であることがわかる。このことは、地上における雨滴粒径分布でも言及しているが、台風性の降雨期間中に、より小さい時・空間スケールの降雨タイプが変化しているためと考えられ、降雨期間中のそれぞれのパラメータの鉛直分布の時系列変化を調べる必要がある。

解析に用いた1994年の台風26号は観測を実施しているMUレーダー観測所の上空を通過するという非常に稀な台風で、台風が目が通過した時刻22:40前後で地上の降雨強度も変化しており、より小さい

時・空間スケールで降雨タイプが変化していると考えられる。台風が目が通過した前後で一連の時刻のパラメータの鉛直分布をFig. 7に示す。Fig. 5(a)でパラメータ Λ' の値の鉛直分布にそれぞれの10分間で幅があるのはFig. 5のガンマ分布で推定される μ, Λ の直線の傾き是一定であるがその直線関係から再定義される $\Lambda'(\mu=0)$ の値にも幅があることに対応している。

これらの図から台風が目が通過した前後でパラメータ Λ', N'_0 それぞれの鉛直分布が大きく変化しており、雨滴粒径分布の鉛直分布も変化してると考えられる。図には示さないが、このようなパラメータの鉛直分布の時間変化はその他の降雨期間中にも現れており、より小さい時・空間スケールの降雨タイプの変化によるもので、その変化をとらえることが可能であることがわかる。

Fig. 5より Λ' は10分程度で変化し、Fig. 7より、 Λ', N'_0 の鉛直方向の関係は、より小さい時・空間スケールでの降雨タイプが変化していることが明らかとなった。以上のことより、解析には式(1)の $\mu=0$ すなわち、指数分布で推定された雨滴粒径分布パラメータ Λ', N'_0 の10分平均値を用いるが、雨滴粒径分布そのものへの影響すなわち、10分平均した雨滴粒径分布が10分間に変化した雨滴粒径分布の代表値を表しているかどうか、議論しておく必要がある。そこで、10分平均した雨滴粒径分布パラメータを用いた雨滴粒径分布と10分間の5時点の観測から推定された雨滴粒径分布の比較を行った。19:50~20:00の10分平均した高度3kmの雨滴粒径分布

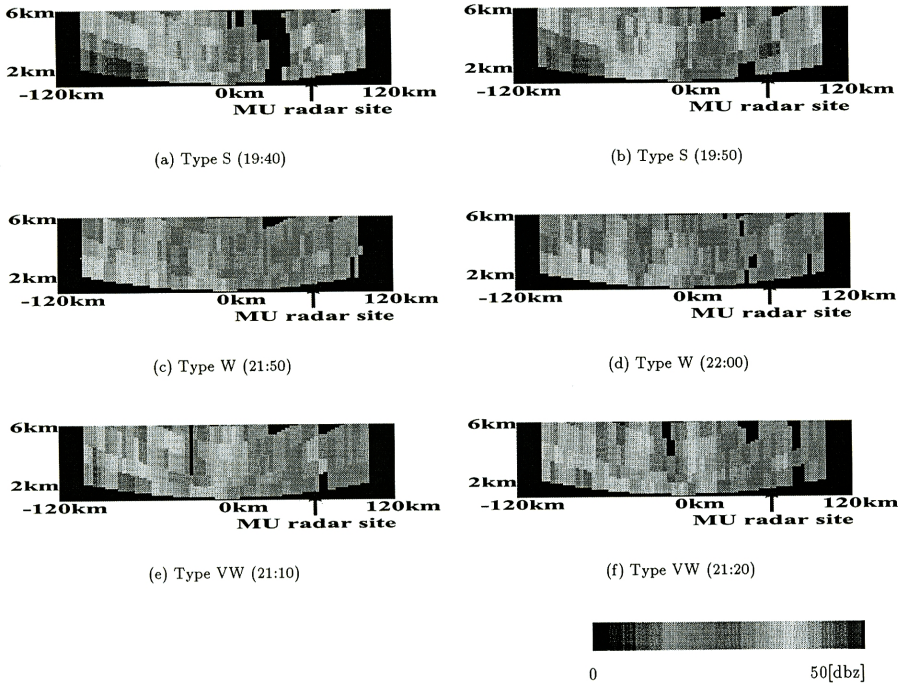


Fig. 9 Vertical profile of radar reflectivity factor Z

パラメータを用いた雨滴粒径分布と10分間に推定された雨滴粒径分布をFig. 8(a)に、21:40~21:50の10分の高度3kmの雨滴粒径分布をFig. 8(b)に示す。

これらの図より、10分間に推定された雨滴粒径分布は10分の間でほとんど変化しておらず、10分平均した雨滴粒径分布と一致しており、10分平均値の雨滴粒径分布でその間の雨滴粒径分布を十分代表している。よって、時々刻々変化するスケールで雨滴粒径分布の鉛直構造解析を行う際には10分平均した雨滴粒径分布パラメータを用いて行う。

4.2 時々刻々変化するスケールでの降雨成因の分類

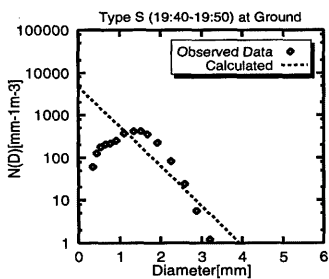
3.2の最後で述べた時々刻々変化するより小さな時・空間スケールでの降雨成因の分類を行った。建設省深山レーダー雨量計で観測されたレーダー反射因子 Z のMUレーダーサイト周辺での鉛直構造に明らかに特徴のある時間帯に着目し、降雨成因の分類を

- Type S : レーダー反射因子 Z の値が非常に

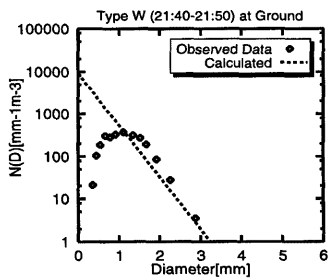
大きい。

- Type V : レーダー反射因子 Z の値がそれほど大きくない。
- Type VW : レーダー反射因子 Z の値が非常に小さい。

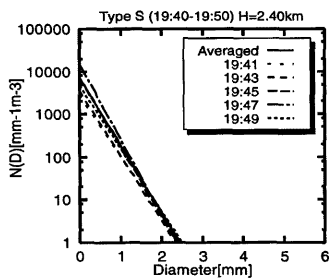
の3つのタイプに分類した。分類した3つの降雨成因のMUレーダーサイトを含む南北方向の直線上空のレーダー反射因子 Z の鉛直構造をFig. 9に示す。図中の水平距離は240kmで、真中を中心にするとう左端が真南の120km、右端が真北の120kmの地点になる。垂直方向は高度2kmから6kmまでを表している。Type Sはレーダー反射因子 Z の値が非常に大きく、水平方向の広がりは小さいことから対流性の降雨と、Type Vはレーダー反射因子 Z の値がType Sより小さく、水平・鉛直方向に一樣であることから層状性の降雨と考えられる。Type VWもType VWと同様に層状性の降雨と考えられるが、レーダー反射因子 Z の値が非常に小さいために、MUレーダーで推定されたパラメータが良好に推定されていない危険性がある。これについては、4.4で再び議論する。



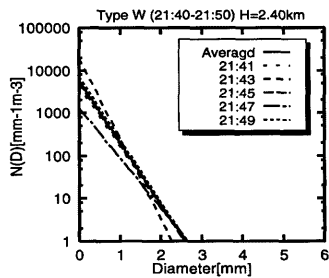
(a) Ground



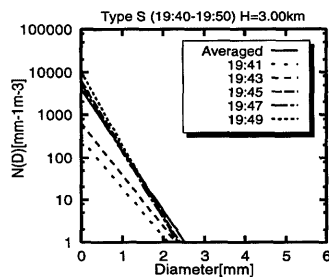
(a) Ground



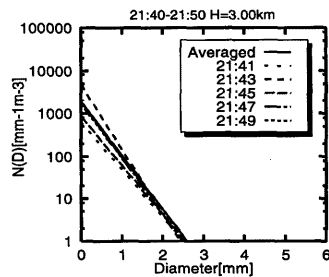
(b) H=2.40km



(b) H=2.40km



(c) H=3.00km



(c) H=3.00km

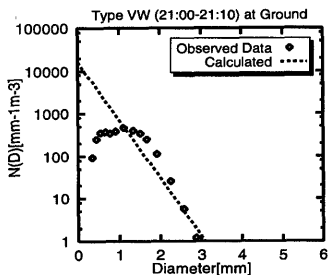
Fig. 10 Vertical profile of DSD:TypeS(19:40-19:50).

Fig. 11 Vertical profile of DSD:TypeW(21:40-21:50).

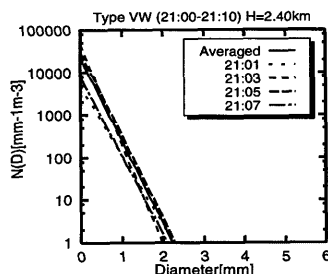
4.3 降雨成因別の雨滴粒径分布の鉛直構造

レーダー雨量計で観測されたレーダー反射因子 Z の鉛直構造から分類した降雨成因を用いて、地上を

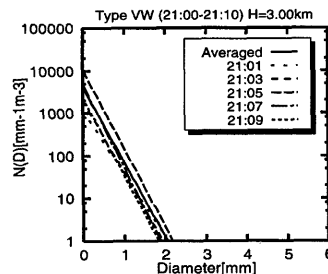
含む降雨成因別の雨滴粒径分布の鉛直構造を明らかにすることを試みた。Type S (19:30~19:40) の雨滴粒径分布の鉛直分布を Fig. 10 に、Type V (21:40~21:50) の雨滴粒径分布の鉛直分布を Fig. 11 に、Type VW (21:10~21:20) Fig. 12 に示す。なお。地



(a) Ground



(b) H=2.40km



(c) H=3.00km

Fig. 12 Vertical profile of DSD:TypeVW(21:00-21:10).

上の雨滴粒径分布は3でも述べた Disdrometer で観測したものを用いている。地上の雨滴粒径分布の図(各図の(a))には、観測値と指数分布で近似した分布の両方を示している。

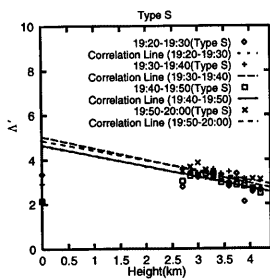
全ての降雨成因において、高度が低くなるにつれて小さい雨滴(直径1mm前後)の数が増加しており、(b), (c)に対応する上空では最大粒径はほとんど変化しておらず、小さい雨滴の数の増加の割合が最大粒径の増大の割合より卓越していることがわかる。このことは、雨滴粒径分布パラメータの鉛直方向の変化に着目すると、 N'_0 の高度変化の方が Λ' の変化よりも変化の割合が大きく、雨滴の落下にともなう雨滴の分裂現象が卓越しているものと考えられる。降雨成因による雨滴粒径分布の鉛直構造としては、厳密に区別することはできないが、Type Sが他の2つのタイプに比べて全ての高度において雨滴の個数が大きく、Type VWの方が全ての高度において雨滴の個数が少ない。

上空の雨滴粒径分布と地上の雨滴粒径分布を比較すると、最大粒径は地上の方が大きくなっており、小さい雨滴の個数も増加している。今回の解析においては、上空2.4km以下の雨滴粒径分布の情報が得られておらず、高度2.4kmから地上に到達する過程で分裂、併合などの現象が生起しているものと考えられるが、雨滴生成過程を詳細に議論するにはこの高度間の観測・検証が必要である。

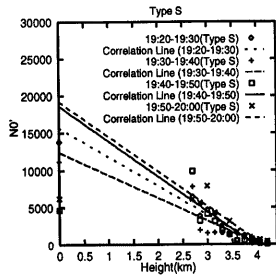
4.4 降雨成因別の雨滴粒径分布パラメータの鉛直分布

降雨成因による雨滴粒径分布パラメータ Λ' 、 N'_0 の鉛直方向の関係を解析し、定式化することで降雨成因による雨滴粒径分布の鉛直分布の定式化を試みた。それぞれの降雨成因における雨滴粒径分布パラメータ Λ' の鉛直分布をFig. 13に、 N'_0 の鉛直分布をFig. 14に示す。ただし、Type VW(各図の(c))については、各パラメータの値がある高度で他の高度に比べて大きな値や小さな値を示す高度が存在し、値がばらついていることがわかった。Fig. 8と同様に10分平均した雨滴粒径分布パラメータを用いた雨滴粒径分布と10分間に推定された雨滴粒径分布の比較を行うと、10分間に推定された雨滴粒径分布パラメータが他の雨滴粒径分布とかけ離れた分布になっていることがわかった。この原因は、4.2の最後でも述べたように、レーダー反射因子 Z の値が非常に小さい時で、上空の雨粒も少ない状態であると考えられ、そのためにパラメータが良好に推定されていないと考える。そこで、Type VWに関しては雨滴粒径分布パラメータが良好に推定されていないと判断される高度の雨滴粒径分布パラメータは除去して解析を行った。

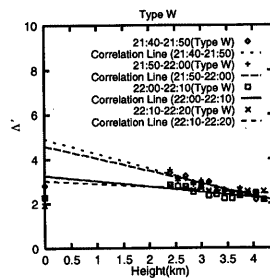
MUレーダーで推定された雨滴粒径分布パラメータの鉛直分布に着目すると(図中の高度2.40km以



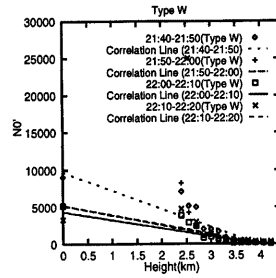
(a) TypeS



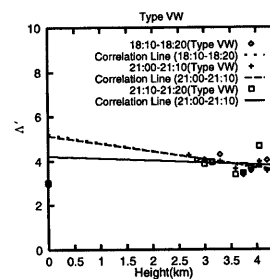
(a) TypeS



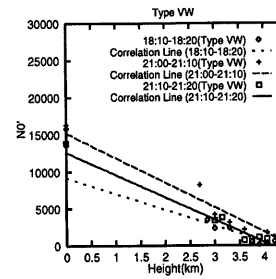
(b) TypeW



(b) TypeW



(c) TypeVW



(c) TypeVW

Fig. 13 Vertical profile of Λ' .

Fig. 14 Vertical profile of N'_0 .

上), 全ての降雨成因に対して雨滴粒径分布パラメータ Λ', N'_0 の鉛直方向の関係は、線形関係;

$$N'_0 = aH + b \quad (8)$$

$$\Lambda' = cH + d \quad (9)$$

が成立しており、図中の直線は回帰分析した結果の関係を示している。式(8)、式(9)で回帰分析した式を用いて地上に外挿して得られるパラメータの値(以下、外挿値と呼ぶ。)と地上観測された雨滴粒径分布を指数分布で近似した時のパラメータの値(以

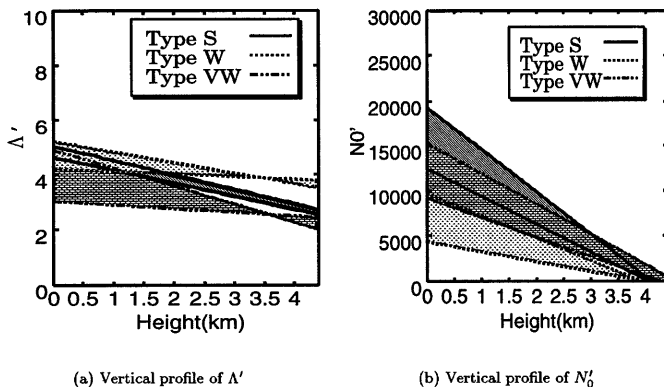


Fig. 15 Vertical profile of Δ' and N'_0 related to rainfall type.

下、推定値と呼ぶ。)と比較することにより、地上の雨滴粒径分布と上空の雨滴粒径分布との関係に着目する。

全体的に外挿値の方が推定値より大きい、雨滴粒径分布パラメータ N'_0 に関しては外挿値と推定値の差は小さく、式(8)で鉛直分布は表現できるものと考えられる。さらに、4.3で述べたように N'_0 の高度変化の割合(回帰直線の傾き)が大きい。一方、 Δ' の高度変化の割合(回帰直線の傾き)は小さい。すなわち、 Δ' は、鉛直方向の変化はあまり変化がなく、むしろ一定とした方が差が小さいように思われるが、雨滴粒径分布そのものの鉛直方向の変化を含めて引き続き調査が必要であると言える。

Fig. 15 に雨滴粒径分布パラメータ Δ' 、 N'_0 の降雨成因ごとの鉛直方向の変化の幅を示す。Fig. 15(a)より、雨滴粒径分布パラメータ N'_0 の鉛直分布は Type S と Type VW は重なっておらず、厳密に分類できるが、Type S と Type W、Type W と Type VW を厳密に分類することはできない。Fig. 15(b)より、雨滴粒径分布パラメータ Δ' に関しては、上空では重なっておらず、降雨成因ごとの分類は可能であると考えられる。

5. 結論

本論文では降雨タイプに依存した形で雨滴粒径分布の鉛直構造を考慮したレーダー雨量推定手法の構築のために、地上および雨滴粒径分布の鉛直プロフィールを観測・解析することにより、降雨タイプに依存した雨滴粒径分布パラメータとその鉛直分布を

明らかにすることを試みた。

地上における雨滴粒径分布については、降雨タイプ別の定式化を行った。降雨期間中に降雨タイプがあまり変化しない梅雨前線に伴う降雨に関しては定式化を行うことができたが、台風性、秋雨前線などの降雨タイプでは降雨期間中に、より小さい時・空間スケールの降雨成因が変化するために今回用いた相関場での降雨タイプによる定式化では十分に雨滴粒径分布を表現することができないことが明らかになった。したがって、対流性、層状性などのより小さな時・空間スケールでの降雨成因による定式化を行う必要がある。

雨滴粒径分布の鉛直プロフィールについては、地上における雨滴粒径分布の解析結果を考慮し、指数分布で推定されるパラメータの鉛直分布を時系列で追跡することによって、時々刻々変化する降雨成因の雨滴粒径分布の鉛直分布をとらえることができた。さらに、10分の間、推定された雨滴粒径分布はほとんど変化しておらず、10分平均した雨滴粒径分布と一致しており、10分平均値の雨滴粒径分布でその間の雨滴粒径分布を十分代表していることを示した。

降雨成因に依存した形で地上を含む雨滴粒径分布の鉛直構造を明らかにし、雨滴粒径分布パラメータの鉛直方向の関係を定式化するために、まず、レーダー雨量計で観測されたレーダー反射因子 Z の鉛直構造に明らかに特徴のある時間帯に着目し、降雨成因を Type S、Type W、Type VW の3つに分類した。次に、雨滴粒径分布の鉛直構造の解析を行い、高度が低くなるにつれて小さい雨滴(直径1mm 前

後)の数が増加しており,最大粒径はほとんど変化しておらず,小さい雨滴の数の増加の割合が最大粒径の増大の割合より卓越し,雨滴粒径分布パラメータの鉛直方向の変化に着目すると, N'_0 の高度変化の方が Λ' の変化よりも変化の割合が大きく,雨滴の落下にともなう雨滴の分裂現象が卓越していると考えられることを示した。

最後に,降雨成因による雨滴粒径分布パラメータ Λ' , N'_0 の鉛直方向の関係を解析し,定式化することで降雨成因による雨滴粒径分布の鉛直分布の定式化を試み,雨滴粒径分布パラメータ N'_0 の鉛直分布に関しては,線形の関係が成立しているが,降雨成因による違いを厳密に分類することはできなかった。しかし, Λ' に関しては,上空の鉛直分布が線形関係が成立しているが,地上の推定値とは必ずしも一致しないが降雨成因による厳密な分類は可能であることを明らかにした。

今後,洪水などの水災害を引き起こす可能性のある梅雨性降雨の観測および解析を行いつつ,本論文で得られた知見をレーダー雨量推定手法に取り込み,レーダーによる地上雨量推定精度の向上をはかりたいと考える。

謝辞

最後になりましたが,本論文で用いた建設省深山レーダー雨量計データは建設省近畿地方建設局淀川ダム統合管理事務所に御提供頂き, MU レーダーのデータは,京都大学超高層電波研究センター信楽 MU 観測所共同利用研究として利用させて頂きました。深く感謝する次第であります。

参考文献

- 寺岡俊浩・佐藤亨・木村馨根・橋口浩之・深尾昌一郎 (1993): 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.
- 中川勝広・中北英一・佐藤亨・池淵周一 (1996), 雨滴粒径分布の鉛直構造に関する研究京都大学防災研究所年報 第 39 号 B-2, pp.301-319.
- 中北英一 (1992): 3 次元レーダーで探る降水現象, 地球観測流体力学, 日本流体力学編, 朝倉書店, pp.27-57.
- Doviak, R. J. and D. S. Zrnic (1984): Doppler Radar and Weather Observations, Academic Press.
- Hardy, K. R. (1963): The Development of Raindrop-size Distributions and Implications Related to the Physics of Precipitation, *J. Atmos. Sci.*, Vol.20, pp.299-312.
- Krajewski, W. F. (1993): Radar Rainfall Estimation, *Report of Proc. US-Spain Workshop on Natural Hazards*, pp.26-43.
- Marshall, J. S. and W. M. Palmer (1948): The Distribution of Raindrops with Size., *J. Meteor.*, 5, pp.165-166.
- Nakagawa, K., Nakakita, E., Ikebuchi, S., Sato, T. and Takasao, T. (1996): Formulation of Vertical Profile of Rain Drop Size Distribution, *Proc. of the Conf. on Water Resour. & Environ. Res.*, pp.651-658 (Vol.1).
- Nakakita, E., Ikebuchi, S., Nakagawa, K., Sato, T., B.E. Vieux and Takasao, T. (1995): Utilization of Vertical 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.
- Srivastava, R. C. (1971): Size Distribution of Raindrops Generated by their Breakup and Coalescence, *J. Atmos. Sci.*, Vol.28, pp.410-415.

Analysis of Vertical Profile of Rain Drop Size Distribution Related to Rainfall Type

Katsuhiro NAKAGAWA*, Eiichi NAKAKITA, Toru SATO* and Shuichi IKEBUCHI

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

The rainfall intensity on the ground is usually not equivalent to the rainfall intensity estimated from the conventional radar. To improve the accuracy of the radar-estimated rainfall, we observe and analyze the vertical profile of the rain drop size distribution (DSD), then create a new formulation of the vertical profile of DSD. Based on the obtained information, first, a new formulation of DSD which considers rainfall type, rainfall intensity and observed DSD from the Disdrometer is developed. Then, the analysis of the vertical profile of DSD in the selected rainfall type is carried out to investigate the possibility of determining relationships among parameters for the DSD.

Keywords : Rain drop size distribution, Vertical profile, Rainfall type MU radar