

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

Parameters of Rain Drop Size Distribution and Their Vertical Profile Depending on Rainfall Type

中川 勝広*, 中北 英一**,

佐藤 亨***, 池淵 周一****

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

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 : vertical profile of DSD, MU radar, rainfall type

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 [1]。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 [2][3]。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、指数分布で雨滴粒径分布を表現し、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。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 [4][5][6][7]。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、実際に地上と鉛直方向の雨滴粒径分布を観測・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。鉛直方向の雨滴粒径分布の観測は、雨滴の落下速度のドップラスベ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スベ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。

*	学生会員	工修 京都大学大学院工学研究科博士課程 (〒 611 京都府宇治市五ヶ庄)	***	工博 京都大学助教授 工学研究科 (〒 601-01 京都市左京区吉田本町)
**	正会員	工博 京都大学教授 防災研究所 (〒 611 京都府宇治市五ヶ庄)	****	正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒 611 京都府宇治市五ヶ庄)

- 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。

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)[8]、中川ら(1996)[9]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鉛直方向の雨滴粒径分布は、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。

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)[10]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、 $\mu_0 = 0$ 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意味している。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。

3 地上における雨滴粒径分布

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、先に述べた推定誤差についてまず触れる。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 の値を図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。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。

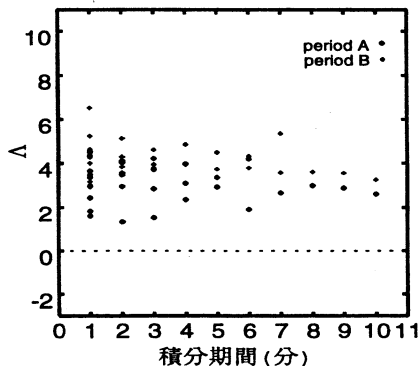


図1: 積分期間を変化させたときのパラメータ Λ のばらつき

次に、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 に着目し、降雨タイプによるパラメータ間の関係を調べ、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。

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なければならない。観測された梅雨性の降雨に伴う雨滴粒径分布のパラメータ μ と Λ の関係を、図 2 (a) に示す。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伴う雨滴粒径分布のパラメータの関係は図 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も式 (5), (6) で表すことが可能である。

式 (5) と式 (6) を式 (1) に代入し整理をすると、

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

となり、式中のパラメータは降雨タイプに依存して表 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。表 1 の \bar{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。

以上のことから、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。

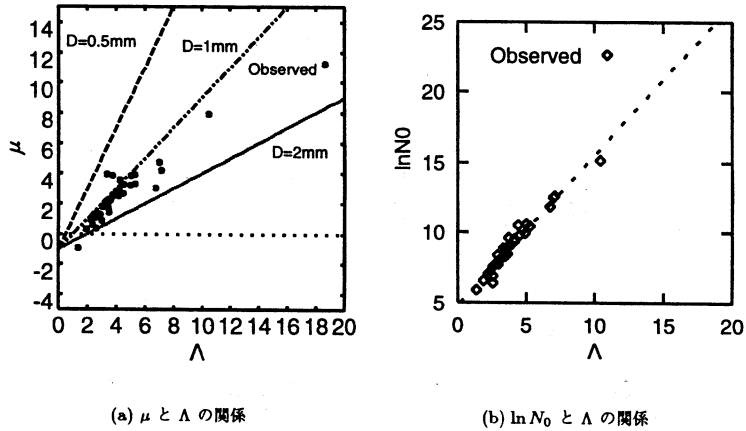


図 2: 地上における雨滴粒径分布のパラメータ間の関係 (梅雨前線)

表 1: 降雨タイプに依存したパラメータ \bar{D} , a , b , Λ の値

降雨タイプ	観測期間	\bar{D}	a	b	Λ
梅雨性	14	1.3 ~ 1.5	1.0	4.7	3~4
台風	9	0.95~1.4	0.8~1.0	6.0~7.6	4~7
秋雨前線	19	0.7~1.7	1.0	5.3~6.5	4~6

4 鉛直方向の雨滴粒径分布

鉛直方向の雨滴粒径分布の解析には、MU レーダー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号に伴う降雨である。解析対象期間は地上の光学式雨量計で観測した降雨強度 (図 3 参照) 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。

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 を図 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。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 (図 5 (a))。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 (図 5 (b))。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。

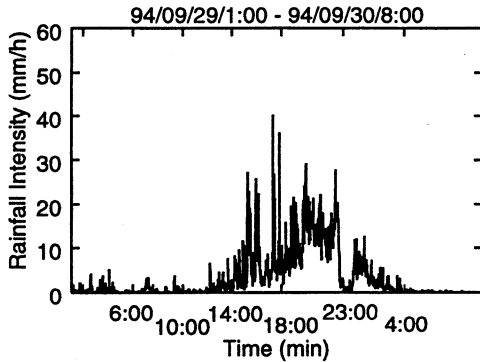


図 3: ハイエイトグラフ

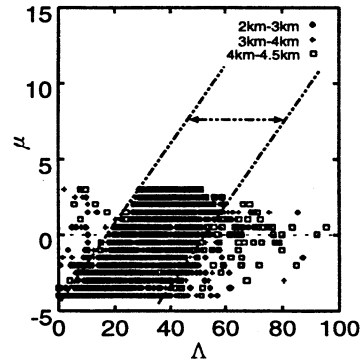
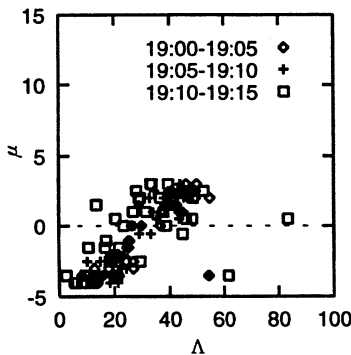
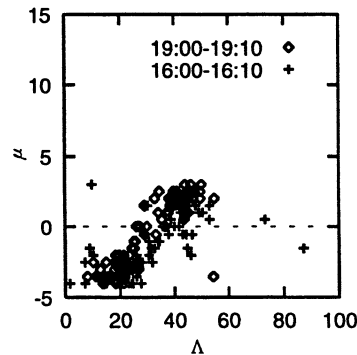


図 4: 解析対象全期間で推定された雨滴粒径分布パラメータ μ と Λ



(a) ある期間 15 分間のパラメータ μ と Λ の関係



(b) 異なる 2 時刻でのパラメータ μ と Λ の関係

図 5: 雨滴粒径分布パラメータ μ と Λ

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 の鉛直分布を図 6 に示す。図 6 (a) はパラメータ Λ' の鉛直分布で、図 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のそれぞれのパラメータの鉛直分布を図 7 に示す。図 5 (a) でパラメータ

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 図 5 のガンマ分布で推定される μ, Λ の直線の傾きは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それぞれのパラメータ Λ', N_0' 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。

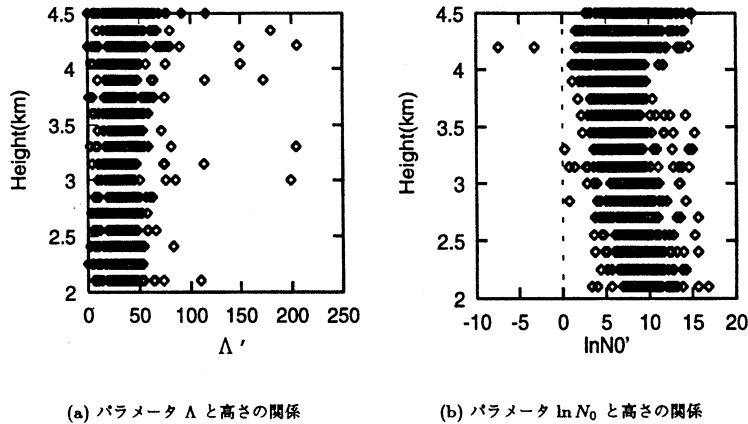


図 6: 解析対象全期間指数分布で推定した場合のパラメータの関係 (18:00 から 23:00)

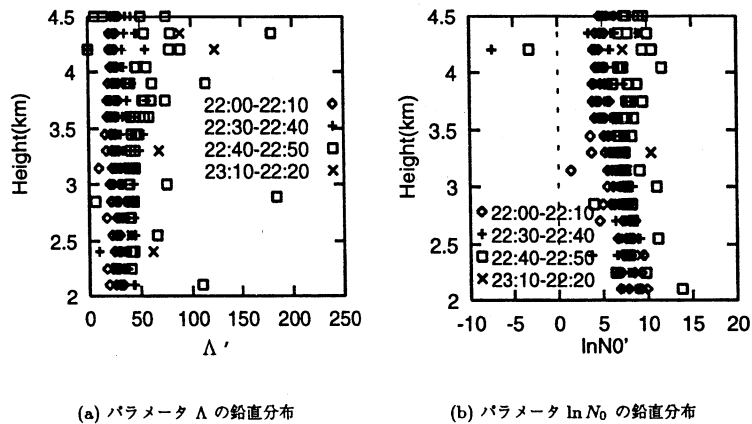


図 7: 台風が目が通過する前後の指数分布で推定した雨滴粒径分布パラメータの鉛直分布

図 8 にパラメータ Λ' と $\ln N_0'$ の関係を示す。図 8 (a) は図 7 に示した期間と同じもので、各パラメータの鉛直分布と同様に台風が目が通過する前後でパラメータ間の関係が変化している。図 8 (b) は 22:00 から 22:10 までの 10 分間のパラメータ $\Lambda', \ln N_0'$ の関係を高度別に示したものである。この図からパラメータ $\Lambda', \ln N_0'$ の関係が高度によって変化し、高度の上昇に伴って Λ' の値が大きくなり、 $\ln N_0'$ の値は小さくなっているのがわかる。 Λ' の値が大きくなると分布の傾きが急勾配になり大きい粒径の雨滴の数が減少し、 $\ln N_0'$ の値が小さくなると分布全体の雨滴の数も減少する。このことは上空ほど降雨強度が小さくなるという実際の現象とも対応しており、より小さい時・空間スケールの降雨タイプで雨滴粒径分布に高度依存性があると言える。図には示していないが、ガンマ分布で推定したパラメータを解析対象全期間で平均したものについても上で述べた高度依存性が確認できる。

以上のことから、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、今回降雨タイプの分類に用いたスケールに比べてより小さい時・空間スケールでの降雨タイプの雨滴粒径分布の鉛直分布をとらえることができる。さらに、その降雨タイプは 10 分程度で変化している。このことは一つの降雨セルの寿命の期間にも対応しており、定式化には 10 分間の平均値を用いて行うことができる。

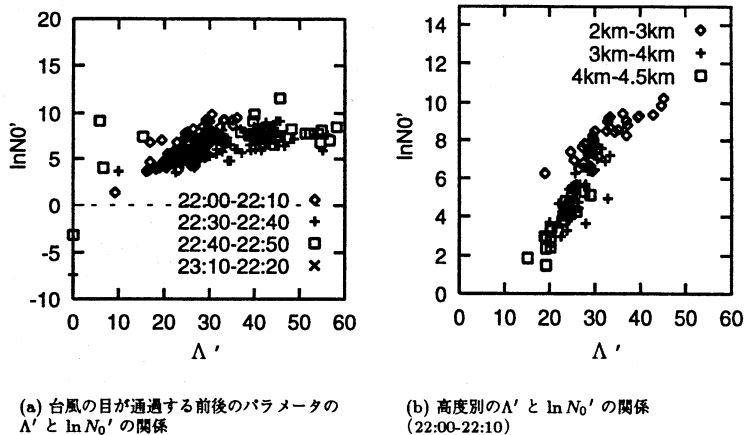


図 8: 台風が目が通過する前後の指数分布で推定した雨滴粒径分布パラメータの間の関係

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、地上および鉛直方向の雨滴粒径分布を観測・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タイプが変化するために今回用いた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。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タイプによる定式化を行う必要がある。鉛直方向の雨滴粒径分布については、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タイプの雨滴粒径分布の鉛直分布をとらえることができ、その降雨タイプは 10 分程度で変化しており、定式化には 10 分間の平均値で行うことができることを示した。今後は、レーダー雨量計のデータの動画や車載型の X バンドレーダーによる観測などを用いて、より小さい時・空間スケールでの降雨タイプを特定することにより雨滴粒径分布の定式化を行い、レーダー雨量推定手法との結合を行う。

参考文献

- [1] 中北英一, 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, 1992.
- [2] Krajewski, W. F., 1993, Radar Rainfall Estimation, *Report of Proc. US-Spain Workshop on Natural Hazards*, pp.26-43.
- [3] Doviak, R. J. and D. S. Zrnic, 1984, *Doppler Radar and Weather Observations*, Academic Press.
- [4] Marshall, J. S. and W. M. Palmer, The Distribution of Raindrops with Size., *J. Meteor.*, 5, pp.165-166, 1948.
- [5] 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.
- [6] Srivastava, R. C., 1971, Size Distribution of Raindrops Generated by their Breakup and Coalescence, *J. Atmos. Sci.*, Vol.28, pp.410-415.
- [7] Hodson, M. C., 1986, Notes Raindrop Size Distribution, *J. Climate and Appl. Meteorol.*, Vol.25, pp.1070-1074.
- [8] Nakakita, E., Ikebuchi, S., Nakagawa, K., Sato, T., B.E. Vieux and Takasao, T., 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, 1995.
- [9] 中川勝広・中北英一・池淵周一・佐藤亨・Baxter E. VIEUX・高棹琢馬, 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, *水工学論文集*, 第 40 巻, pp.297-303, 1996.
- [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.