

近赤外レーザーを利用した降水粒子観測プローブの開発

Development of hydrometeor observation probe by near-infrared laser

辻 淳一[†], 津田 紀生^{††}, 山田 諄^{††}, 民田 晴也^{†††}

Junichi Tsuji, Norio Tsuda, Jun Yamada, Minda Haruya

Abstract A polarimetric radar is used forecast of rain. The advantage of this radar is able to observe cloud on a real-time in wide area. But rain-rate estimated by radar includes an error. The radar reflectivity factor is depend on hydrometeor shape (raindrop, snowflake, etc...) and Drop Size Distribute (DSD) in sensing area. Currently, advance of precise estimation algorithm by direct observation (Balloon observation, aircraft observation) in radar beam is becoming important. This study develops a laser hydrometeor imaging probe with capability of DSD measurement (Laser Probe) for balloon observation. Laser Probe is consists Laser Diode(LD), Line Photo Diode (LPD) and circuits for data processing. The horizontal resolution is 0.125 mm and line-rate is 30 kHz. A accuracy experiment and a rainfall observation by using the probe are carried out. From accuracy experiment with grass ball, measurement error is within 1 pixel (0.125 mm). The next, rain observation was performed using laser probe with impact type disdrometer RD69 and DSD from observation result is compared. The probe DSD shape is similar to RD69 DSD, however the number of density by Laser Probe is less than that by RD69.

1. はじめに

昨今、温暖化・都市化と絡んで多発している局地的豪雨や突風などによる災害が目についている。過去半世紀の観測データの分析では、大雨の頻度が 1990 年代以降特に高くなる傾向が見られる。豪雨・豪雪を伴う気象（シビアストーム）を的確に探知・予測し、少しでも早い避難情報が極めて重要となる。このような状況下、降水レーダの更なる降雨予測精度・降雨量推定精度の向上が求められる。降雨予想には降水レーダが使用されている。降水レーダの利点は広範囲の降水現象のリアルタイム監視であるが、その降水強度には大きな推定誤差を含む。レーダ反射強度は降水粒子の後方散乱断面積と粒径分布 (DSD:rainDrop Size Distribution) に依存する。反射強度から降水強度の換算では、平均的な DSD を仮定した経験式

を適応するが、DSD の時空間変動は激しく、DSD ミスマッチによる推定誤差が生じる¹⁾。現在のレーダ降水強度補正手法として、気象庁のレーダアメダス合成図がある²⁾。レーダ降水強度は地上雨量計ネットワークを用いて補正するものであるが、この手法には機器間の(1)時空間分解能の差と(2)観測高度の違いの問題がある。更に、地上雨量計の間隔は 10 km 以上であり、降水の水平スケールに比べ粗い問題もある。

(1)レーダはビーム内平均の瞬時値を観測する。これに、対して、雨量計は低時間分解能（数分から時間雨量）の点雨量を観測する。

(2)レーダは上空の降水現象を、雨量計は地上雨量を観測する。言うまでもなく、降水の鉛直分布変動は激しい。例えば、気温・気圧の差、大気境界層と自由対流圏の違い、地上と上空では多くの相違点があり、地上観測から単純検証することは困難である。

現在まで多くの研究者が、地上観測からレーダ降水強度の高精度化を試みてきたが未だ確立できていない³⁾。近年のマイクロ波降水リモートセンシング高精度化のアプローチは、レーダビーム内に存在する DSD の遠隔計測（推定）の実現である。レーダによる DSD 推定技術は大きく 3 つある。

† 愛知工業大学大学院 工学研究科
電気電子専攻 (豊田市)

†† 愛知工業大学 工学部 電気学科
電気電子工専攻 (豊田市)

††† 名古屋大学 地球水循環研究センター
(名古屋市)

(1) vertical pointing Doppler radar の FFT スペクトルを利用する方法^{4) 5)}。落下速度から粒子粒径を求め、スペクトル強度密度から数濃度を算出する。

(2) 多周波レーダ^{6) 7)}。マイクロ波散乱の周波数特性の違いを利用。

(3) 2 偏波レーダ (POL: POLarimetric radar) の偏波シグナルを利用した DSD 推定⁸⁾。

POL の偏波パラメータは、DSD 推定に加え、降水粒子判定 (雨、雪、霰など)⁹⁾、降雨減衰量計測¹⁰⁾ に利用ができる。ここで、降水粒子種別判定技術はマイクロ波散乱特性を決める重要な課題であり、固体降水粒子 (雪、霰など) の散乱特性は理論的にも、観測的にも知見が不十分であり、重大な研究テーマの一つである。降雨減衰も、波長の短いレーダほど降雨減衰の影響を受け、X-band 以上の周波数のレーダでは降雨減衰補正のインパクトは大きいいため重要な研究テーマである。本論文では、レーダ降水強度の高精度化、DSD 推定技術、粒子判別は議論しない。

本研究では、DSD 推定、降水粒子種別判定アルゴリズムの検証実験として、上空の降水粒子の直接観測の必要性の高まりから、気球観測でレーダビーム内の降水粒子形状と DSD 計測の実現を狙っている。レーダビーム内の同期観測は、航空機観測による直接観測がある¹¹⁾。航空機観測は、安全飛行できる降水セルに対しては自由度が高い観測ができる利点があるが、非常に高コストである。気球観測は、狙ったセルの飛翔は困難だが、激しい雨でも観測が可能であり、航空機観測に比べ安価な利点がある。現在、ビデオゾンデ^{12) 13)}が開発されレーダとの同期観測が行われている¹⁴⁾。ビデオゾンデは粒子種別判定ができるが、カメラ撮影のため粒子観測数が少なく DSD が算出できない、レーダ反射強度との比較ができない課題が残っている。

本研究では、DSD 計測を行うため、シート光を通過する降水粒子を高速スキャンする方式を採用し、小型気球で連続観測するため、軽量、かつ、廉価な降水粒子観測プローブ (Laser probe) の開発を行っている。まずは地上観測機器としての開発と安定性向上、既存の降水粒子観測機器との検証実験から計測能力の評価を行った。

2. 機器概要

2・1 機器構成

Fig.1 に Laser probe の構成概略図、Table.1 にスペックを示す。プローブは大きく投光部、受光センサに分かれており、これらは雨避け用のアルミフレーム筐体に収納されている。投光部はシート光を生成する半導体レーザ

(LD) と光学レンズから構成されており、LD の波長は 785 nm、光出力は 10 mW で連続発振している。受光センサにはラインフォトダイオード (LPD) を用いている。1 pixel の分解能 0.125 mm の PD が 64 pixel で 1 つのブロックになっており、2 ブロックが 1 列 (128 pixel × 1 ライン) で配置されている。クロック周波数は 30 kHz となっている。

光源で生成されたシート光をレンズを通し平行ビームに変え、LPD に照射する。この状態時に降水粒子がセンシングエリアを通過すると粒子の影を LPD が計測するシステムとなっている。センシングエリアはフレーム開口部から見える有効ビーム幅となる。防水能力向上のため 12 月にフレームをアップデートしており、9 月～12 月初期までのセンシングエリアは 12 cm²、それ以降は 20.8 cm² となっている。

プローブは LPD の駆動及び計測データ処理、PC へ転送を行うマイコン、レーザを駆動する APC 回路を別のケースに設置し接続している。レーザプローブに供給する電源は PC の USB バスパワーで全て賄われており、観測、実験時には常に接続しておく必要がある。

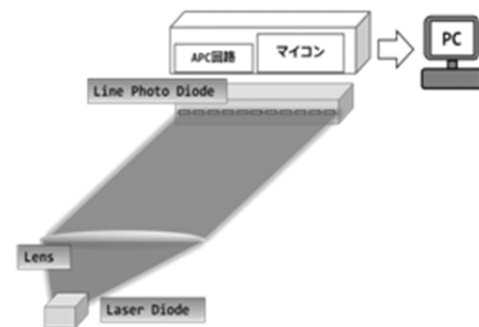


Fig. 1 レーザプローブ機器構成

Table. 1 レーザプローブスペック

LD (L785P025)
波長 : 785 nm
光出力 : 10 mW
LPD (TSL202R)
素子数 : 128 pixel
センサ幅 : 16 mm
分解能 : 0.125 mm
応答周波数 : 700nm
ラインレート : 30kHz
センシングエリア (光路長 × センサ幅)
2011/9/20～12/2 : 75 × 16 mm
2011/12/3 以降 : 130 × 16 mm

2・2 計測原理

Laser probe は既製品の地上観測機器である 2DVD¹⁵⁾、航空機搭載プローブ(PMS)と同じ、シート光を通過する降水粒子をスキャンする方式を用いている。LPD の 128 pixel 全て受光されている状態で降水粒子がセンシングエリアを通過すると計測が開始する。Fig.2 に計測原理概要を示す。計測時間 t_1 に粒子端部がセンシングエリアに侵入すると粒子直径の影をスキャンする。スキャンしたデータは 2 値に区分けされた後、マイコンのメモリに一時的に格納される。センシングエリアに降水粒子がまだ存在するならば、 t_2 、 t_3 と同様に計測を行い、 t_4 のように粒子が完全通過し終わると、格納していたデータをプローブに接続されている PC に転送する。転送後のデータは Fig.3 のように各時間の計測ラインを重ね、画像化する。Fig.3 の場合、最も粒子直径を捉えている t_3 が計測値となる。計測速度はラインレートによって制御され、プローブのラインレートは 30 kHz となっている。

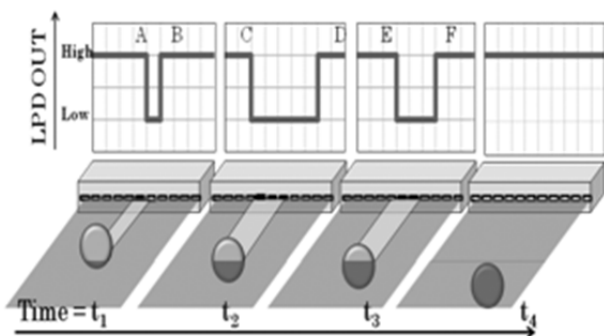


Fig. 2 計測原理

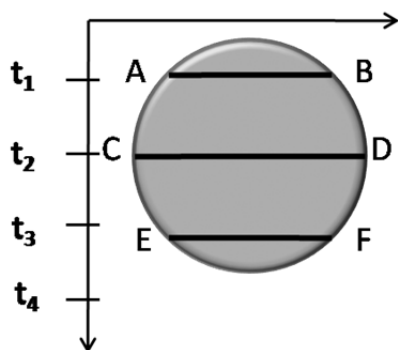


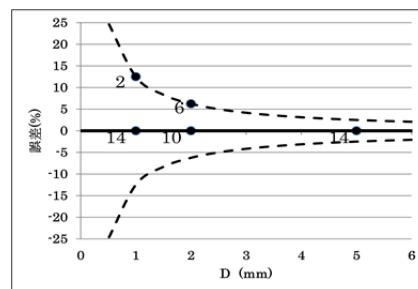
Fig. 3 転送後の画像イメージ

3. 実験及び観測結果

3・1 精度実験

Laser probe のセンシング内におけるビーム平行度を検

証するため、直径が分かっているガラス球をシート光に通過させ、計測精度の評価実験を行った。ガラス球は直径 1,2,5, mm の 3 種類を使用し、平行ビーム発射直後(レンズ近傍)とセンサ照射直前(LPД 近傍)、そして光路中間の各 3 ヲ所にガラス球を 50 回落下し、直径サイズと計測値の誤差を調べた。



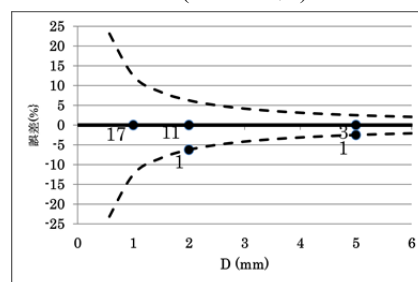
レンズ近傍

---計測個数---

1mm (0% : 14 個 12.5% : 2 個)

2mm (0% : 10 個 6.25% : 6 個)

5mm (0% : 14 個)

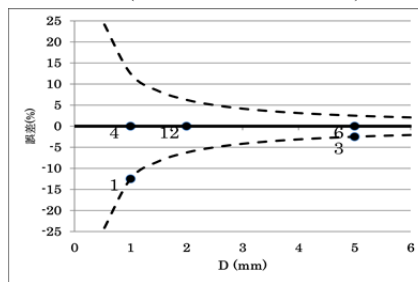


(光路中間点)

1mm (0% : 17 個)

2mm (0% : 11 個 6.25% : 1 個)

5mm (0% : 3 個 2.5% : 1 個)



(LPD 近傍)

1mm (0% : 4 個 12.5% : 1 個)

2mm (0% : 12 個)

5mm (0% : 6 個 2.5% : 3 個)

Fig. 4 計測精度実験結果

Fig.4 に実験結果のグラフを示す。横軸がガラス球直径、縦軸が直径サイズと計測値との誤差となる。グラフ中の

マーカーが計測結果、マーカー下にかかれている数字は計測回数、誤差 0% の直線は理論線、破線曲線が誤差 ±1 pixel (0.125 mm) となる。レンズ近傍では誤差は 1 pixel 以内に収まる結果となり、またその誤差もほとんどなく、ほぼ実際の直径サイズの影を取得することができた。またこれは光路中間点、LPD 近傍でも同様の結果が得られた。このことから Laser probe のセンシングエリア内におけるビーム平行度が保たれていると考えられる。

3・2 降水粒子画像

Fig.5 に取得した降水粒子画像を示す。画像横幅は 16mm となっている。図中の黒い部分が取得したデータの雨滴の影となっている。降雨観測は全て愛知工業大学の屋上でやっている。画像の横幅は LPD センサの 128 pixel (16 mm) となり、左端の画像から右に A~F に続いている。Laser probe が 1 分間に取得した影のサンプル数は約 300、激しい雨では 700 個程度取得し、また雨滴 1 個に対する計測ライン数は 5~15 ラインであった。

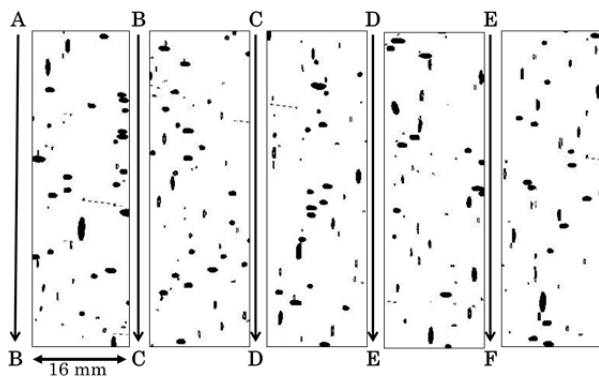


Fig. 5 降水粒子画像(1 分間)
観測日時：2011/09/20 06:26

取得した降水粒子画像には塵や埃などの細かい粒子ノイズも観測している。画像からでは雨滴粒子とノイズの判別がつかないため Laser Probe が雨滴を正しく取得出来ているか推測しづらい。そこで Fig. 6 のような粒子直径と粒子に対してプローブが計測したライン数の関係グラフを作り粒子とノイズの判別を行った。グラフの赤線がラインレート 30 kHz における理論計測ライン数、カラースケールがプローブの観測数となる。粒子直径が 1 mm 以下の観測数はノイズが混在しているためばらついてはいるが、粒子が大きくなるにつれ多少ばらつきはあるもののプローブが理論計測ライン数に近いラインを取得していることが分かった。

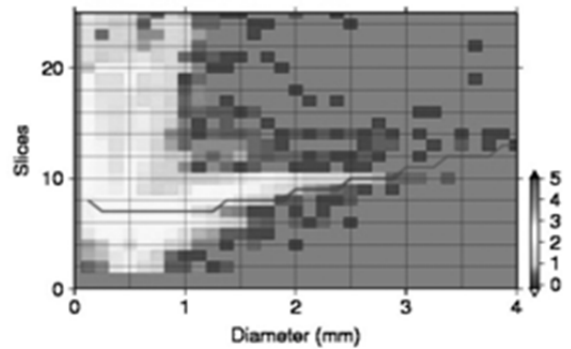


Fig. 6 Diameter vs. slice

3. 3 降雨観測

3.2 節で Laser Probe が雨滴を計測出来ていることが分かった。次にプローブを既存の地上雨滴分布計 RD69 とともに実際にプローブの降雨観測を行い、DSD を作成し比較評価を行った。RD69 は雨滴衝突時の運動量から雨滴径を算出する¹⁵⁾。RD69 のセンシング面積は 50 cm² であり、laser probe の 4 倍となる。

11 月の降雨観測から検出した結果を Fig.7 に示す。横軸が計測した粒子の直径、縦軸がサンプル数となる。グラフから、プローブの全体的な検出傾向は RD69 に近似した結果となった。雨滴の検出数に差があるが、これはプローブと RD69 のセンシングエリアに約 4 倍の差があるためである。またプローブは粒子直径 2.7 cm 以上は計測出来ないが、これはプローブの有効ビーム幅が 16 mm と粒子に対し、狭い範囲となっているためと考えられるため今後、ビーム幅を拡幅し改善する必要があることがわかった。

Fig7-(b) に示す。横軸が粒子直径、縦軸が雨滴粒径分布となる。プローブの DSD が RD69 と非常に近く、また傾向も似ている結果となった。降雨観測は 11 月のほ

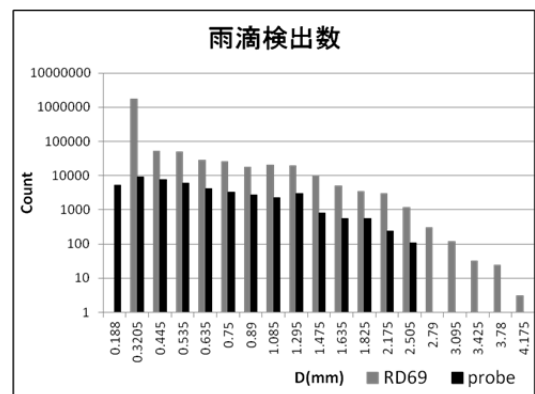


Fig. 7-(a) 雨滴検出数(11 月)

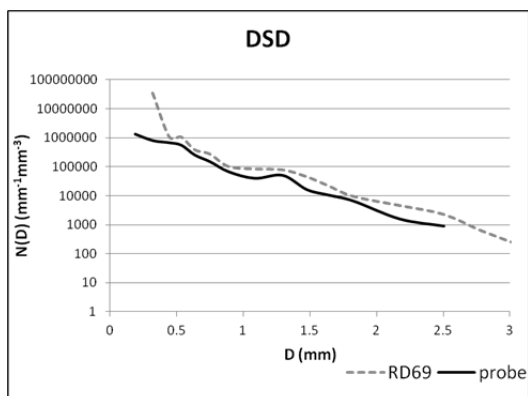


Fig. 7-(b) DSD(11月)

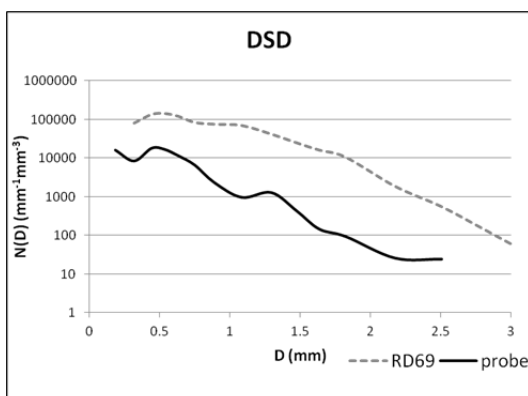


Fig. 8-(a) DSD(10月)

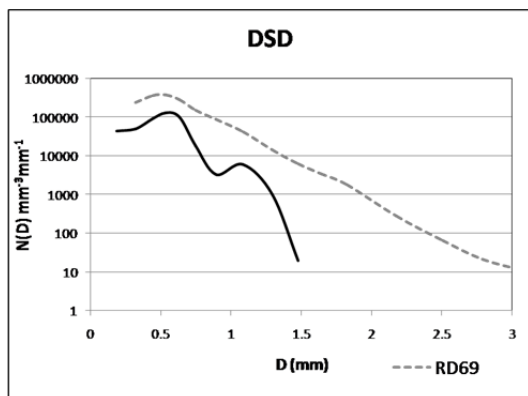


Fig. 8-(b) DSD(12月)

か10、12月も行っており作成したDSD結果をFig.8に示す。どちらもプローブの検出量はRD69の検出量の約1/10~1/100の差があらわれており、このことから降水量の高い時期、低い時期など雨の強弱に左右されていると考えられる。またプローブのDSDの形状は粒子径1mm以上の時点からRD69から離れていく結果が多くなった。10月は降雨が激しく、レンズ、LPDへの雨滴の付着が多かったため検出できた雨滴の個数が少なく、作成したDSDは全体的に $N(D)$ がRD69より低く、粒径1.3mm以上は $N(D)$ が1000以下となり計測精度が低い

結果となった。強い雨ほど雨滴個数が多く、地面や筐体に弾かれる水滴も増えるため、それらがLPD、レンズへの着水に繋がっていると考えられる。逆に12月は降水量が低く、着水による計測エラーは生じていないが、雨滴個数が少なすぎるため、現在のプローブのセンシングエリア(12 cm^2)ではほとんど取得できなかったため作成したDSDのグラフは大きくかけ離れた結果となった。11月は検出量、DSD共に最もRD69に近い結果となった。以上から降水量が高く強い雨や降水量が低く細い雨に対してはプローブの計測能力は変動が強くみられるが、11月のような適度な降水量の雨に対してはRD69デイスドロメータに近い計測能力を示しDSDを作成できる。変動を抑える対策として強い雨の観測は筐体の防水能力の向上、弱い雨にはセンシングエリアの拡幅が重要になる。

4. まとめ

本研究は上空の降水粒子形状計測、雨滴粒径分布推定の精度向上を目的とした校正機器として、小型気球に取り付け連続観測が行うことができる軽量、かつ、廉価なDSD作成能力を持つ降水粒子観測プローブを開発している。シート光を通過する粒子をスキャンする既存の計測法を用いたLaser Probeの開発を行い、今回は地上観測機として計測能力、安定性を調べるため、計測精度実験及びRD69と併設した降雨観測を行った。結果、11月は地上雨滴分布計RD69のDSDグラフに比べレーザープローブのDSDは似たような形状を取得することができた。しかし10、12月は降水粒子が大きくなるにつれRD69の結果から離れていく過小評価対象になった。レーザープローブが細かい降水粒子に対しては計測ライン数が比較的少なく現状のラインレートで十分計測可能であったが、大きい降水粒子に対しては1個の雨滴に対しての取得ライン数が多くかかるため1個の粒子計測中に他の粒子はあまり計測できなかったことが原因と考えられる。またレーザープローブのスキャン幅が16mmのところ大きな降水粒子の直径は3mm近くになるため、センシングエリアエッジでの観測が多く形状が捉えることができず破損データとなってしまった事も原因の1つと考えられる。またある1分間における総雨滴検出数においてRD69は750個/minだったところレーザープローブは240個/minと約4/1程度の検出数だった。10~12月の観測期間全体的に見て、laser probeの検出量は11月を除き、RD69の検出量の約1/10~1/100の差があらわれた。高い降水量は雨滴個数が多くなり、地面や筐体に弾かれる水滴も増えるため、それらがLPD、レンズへの着水し計測できなく

なることが多くみられた。逆に低い降水量の雨は着水による計測エラーは生じていないが、雨滴個数が少なすぎるため、プローブの検出量が非常に低い結果となった。これらのことから降水量の高い時期、低い時期など雨の強弱によってプローブの計測能力が左右されていると考えられる。またプローブの DSD の形状は粒子径 1 mm 以上の時点から RD69 から離れていく結果が多くなった。雨滴粒径が大きくなるほどセンシングエリアを通過する前に弾かれる可能性が高くなるので大きな粒径の取得にはセンシングエリアの拡幅が重要になる。

参考文献

- 1) Campos, E., and I. Zawadzki, "Instrumental uncertainties in Z-R relations", *J. Appl. Meteor.*, Vol. 39, pp.1088-1102 (2000).
- 2) Makihara, Y., N. Kitabatake and M. Obayashi "Recent development in algorithm for the JMA now casting system. Part 1: Radar echo composite and radar-amedas precipitation analysis", *Geophysical Magazine Series 2.*, Vol. 1, pp. 171-204 (1995).
- 3) Minda, H., and K. Nakamura, "High temporal resolution path-average rain gauge with 50-GHz band microwave", *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, Vol. 22, pp.165-179 (2005).
- 4) Gossard, E. E., "Measuring drop-size distributions in clouds with a clear-air-sensing Doppler radar", *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, Vol. 5, pp.640-649 (1988).
- 5) Lo., ffler-Mang, M., and M. Kunz, "On the performance of a low-cost K-band Doppler radar for quantitative rain measurements", *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, Vol. 16, pp.379-387 (1999).
- 6) Williams, C. R., W. L. Ecklund, and P. E. Johnstone, "Cluster analysis techniques to separate air motion and hydrometeors in vertical incident profiler observations", *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, Vol. 17, pp. 949-962(2000).
- 7) Rose, C. R., and V. Chandrasekar, "A GPM dual-frequency retrieval algorithm: DSD profile-optimization method", *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, Vol. 23, pp. 1372-1383(2006).
- 8) Zhang, G., J. Vivekanandan, and E. Brandes, "A method for estimating rain rate and drop size distribution From polarimetric radar measurements", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.*, Vol. 39, pp. 830-840(2001).
- 9) Ryzhkov A. V., and D. S. Zrnic', "Discrimination between rain and snow with a polarimetric radar", *J. Appl. Meteor.*, Vol. 37, pp. 1228-1240(1998).
- 10) Anagnostou, M. N., E.N. Anagnostou, and J. Vivekanandan, "Correction for rain path specific and differential attenuation of X-band dual-polarization observations", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.*, Vol. 44, pp.2470-2480 (2006).
- 11) Lawson, R.P., D.O' Connor, P.Zmarzly, K. Weaver, B. Baker, and Q. Mo, "The 2D-S (stereo) probe: design and preliminary tests of a new airborne,high-speed, high-resolution particle imaging probe", *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, Vol. 23, pp.1462-1477 (2006).
- 12) Takahashi, T., "Near absence of lightning in torrential rainfall producingmicronesia thubderstorms", *Geophys. Res. Lettr.*, Vol. 17, pp.2381-2384 (1990).
- 13) Orikasa, N., and M. Nurakami, "A new version of hydrometeor videosonde for cirrus cloud observations", *J. Meteor. Soc. Japan.*, Vol. 75, pp.1033-1039 (1997).
- 14) 中北英一, 山口弘誠, 隅田康彦, 竹畑栄伸, 鈴木賢士, 中川勝広, 大石哲, 出世ゆかり, 坪木和久: 「C バンド偏波レーダを用いた降水粒子識別とビデオゾンデを用いた集中同期検証観測」, 京都大学防災研究所年報, Vol. 51, pp.519-533 (2008).
- 15) Joss, J., and A. Waldvogel, "Raindrop size distribution and sampling size errors", *J. Atmos. Sci.*, Vol.26, pp.566-569. (1969).

(受理 平成 24 年 3 月 19 日)