

半導体レーザーによる降雪センサの開発

Development of Snowfall Sensor by Semiconductor Laser

牧野智也[†], 津田紀生^{††}, 山田諄^{††}, 民田晴也^{†††}

Tomoya Makino, Norio Tsuda, Jun Yamada, Haruya Minda

Abstract: By polarimetric radar, remote rainfall sensing technique is advancing but snowfall sensing is not advanced. For snowfall sensing, a disdrometer that has capability of hydrometer imaging in radar beam area is needed. A low-cost disdrometer with laser line scanner which has 48 mm (384 pixel) image width and slice rate at 12 kHz for snowfall is developed. For comparing, disdrometer for rainfall which has 16 mm (128 pixel) image width and slice rate at 22 kHz is developed and test observation that used both disdrometer was carried out at Zaozan (Yamagata pref.). The 48 mm width disdrometer could observe whole image of snowfall compared to 16 mm disdrometer and enough performance for snowfall imaging was signified.

1. はじめに

降水レーダは降水強度(R)を即時提供するが、降水レーダは降水強度を直接測定せず、レーダ反射因子(Z)を測定するため降水強度には推定誤差が存在する。

レーダ反射因子は単位体積当たりの降水粒子によるマイクロ波後方散乱断面積によって決定され、一般的に、降水強度はレーダ反射因子と統計値から算出する $Z-R$ 関係が用いられるが、これには雨滴粒径分布(DSD: Drop Size Distribution)が依存しているため、DSD の観測が重要である¹⁾。

近年における偏波降水レーダの発展により、降雨に対してのレーダ降水強度推定技術は発展し、レーダ反射因子に加え、上空における降水粒子種別判定、DSD の推定に有効なパラメータの取得が可能となった。一方、降雪観測に対しては進展が少ない。これは降雪の要因である固体降水粒子は氷晶、雪片、あられを例として、多種多様な形状および、含水率を持つ事により、マイクロ波散乱問題が解決されておらず、粒子判定アルゴリズムが確立されていない事が原因である。

この問題解決には、気球を用いてレーダビーム空間中の降雪粒子を直接観測し、降水粒子種別、およびその特徴を画像で取得可能な補助、校正装置もしくは、地上における面的な観測を行える装置により、偏波降水レーダ

が取得したパラメータとの比較が有効であると考えられる。

以上より、廉価かつ軽量で、降水粒子を直接画像取得可能な粒径分布計が必要であり、高精度な降雪リモートセンシング、マイクロ波散乱計算技術の向上、広範囲な観測ネットワークの構築を目指す。

既存する直接観測可能な装置の例として、気球観測装置であるビデオゾンデが挙げられる²⁾。これはビデオカメラとフラッシュライトにより降水粒子を直接撮像する方式であり、粒子種別判定が可能だが取得粒子数が少ないという課題が存在する。また、航空機観測用の 2D-S Probe および、地上観測用の 2DVD が存在し、これらは高速なラインスキャナ型観測装置であるが、いずれもコスト面での課題が残っている³⁾⁴⁾。

本研究では、2D-S Probe などと同様にラインスキャナによる、安価な半導体レーザーを用いた粒径分布計(LLD: Low-cost Laser Disdrometer)を開発した⁵⁾。これまで気球観測に先立ち、計測幅 16 mm (128 pixel)の地上用雨滴観測装置(LLD128)を開発し、降雨観測に対しての計測性能および DSD の有効性を示した。しかし、降雪観測に対しては計測幅の不足により、衝突併合した大型の降雪粒子はその全体を撮像できず十分な性能を示す事ができなかった。

本稿では引き続き、地上用観測装置として降雪観測に特化した LLD の開発過程、および降雪試験観測の結果について論ずる。

2. 原理

半導体レーザーと 1 次元イメージセンサによりラインス

† 愛知工業大学 大学院 工学研究科
電気電子工学専攻(豊田市)

†† 愛知工業大学 工学部 電気学科(豊田市)

††† 名古屋大学 地球水循環研究センター
(名古屋市)

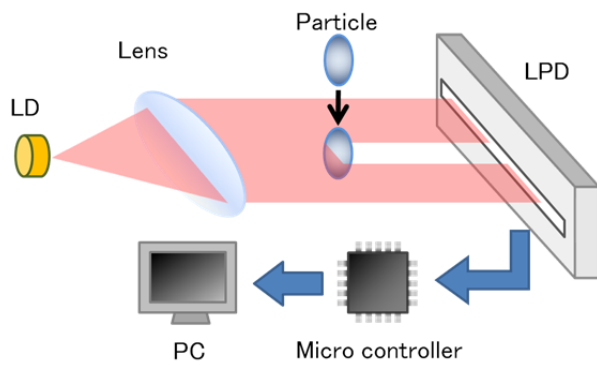


Fig. 1: LLD 概要

キャナを構成した。LLD の概略図を Fig. 1 に示す。

光学系は光源であるレーザダイオード(LD: Laser Diode)、シート光を生成するレンズ、1次元イメージセンサのラインフォトダイオード(LPDP: Line Photo Diode)からなり、LPD の制御および PC との通信はマイコンが行う。

物体がシート光中を通過したとき、シート光は遮蔽され、その影を撮像する。撮像された1次元画像を累積し、PCへ転送、2次元画像へ画像変換、及び画像解析を行う。

3. 開発装置

LLD128 から計測幅の拡幅を行い、48 mm (384 pixel) を目標に降雪観測用 LLD を開発した。以降、開発した LLD を LLD384 とする。

3.1. 機構部品

LLD384 は機構部品及び、光学系部品から成る。機構部品は3Dプリンタで製作し、加工誤差を抑えた。

光学系部品はLDマウント、レンズマウント、スリット、LPDマウントから成り、これらをアルミフレームにより保持する。スリットは光学系へのゴミ等の付着を防ぐ。なお、マイコンは別の防水ボックスへ収納した。

4. 2LD方式の開発

計測幅拡幅に伴い、適切なシート光生成方法が必要である。

2LD方式はLDとレンズを2個LPD幅方向へ並べ拡幅を行う方式である。内部構造を Fig. 2 に、仕様を Table 1 に示し、本方式による LLD を LLD384-2LD とする。

PC との通信には Ethernet (UDP) を使用し、電源は LAN ケーブルの空き端子から給電する PoE (: Power on Ethernet) を構成した。

シート光を拡散光としたとき、双方のシート光の間に光が届かない空白部分が生じたため、シート光は拡散光

として空白部分を埋めた。

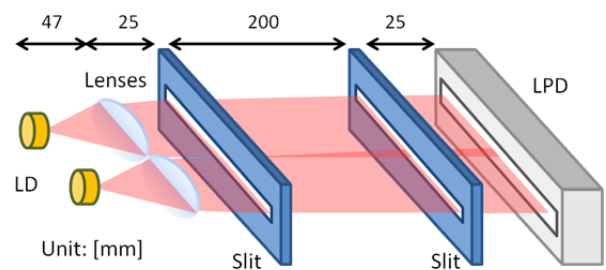


Fig. 2: LLD384-2LD 概要

Table 1: LLD384-2LD 仕様

Name	LLD384-2LD	LLD128
LD wavelength [nm]	780	780
LD power [mW]	< 10	< 10
Lens [mm dia.]	25	25
Light sheet width [mm]	≒ 50	≒ 23
LPD resolution [μ m]	125	125
LPD pixel number [pixel]	384	128
Slice rate [kHz]	10	33
Sampling area (W×D) [mm]	48×130	16×130
Sampling aperture (W×D) [mm]	150×130	80×130

4.1. 石川県美川町における降雪試験観測

LLD384-2LD と LLD128 による同期降雪試験観測を石川県美川町にて、2013/02/01 から 2013/02/09 まで行った。LLD の設置状況を Fig. 3 に示す。LLD の周囲は防風フェンスで囲み風の影響を低減した。

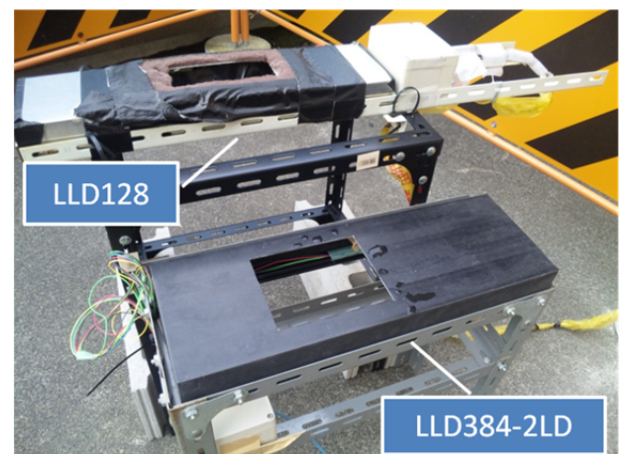


Fig. 3: LLD の配置状況

2013/02/06 03:35 JST における LLD384-2LD によって得られた降雪粒子の画像例を Fig. 4 に、LLD384-2LD によって得られた画像例を Fig. 5 に示す。

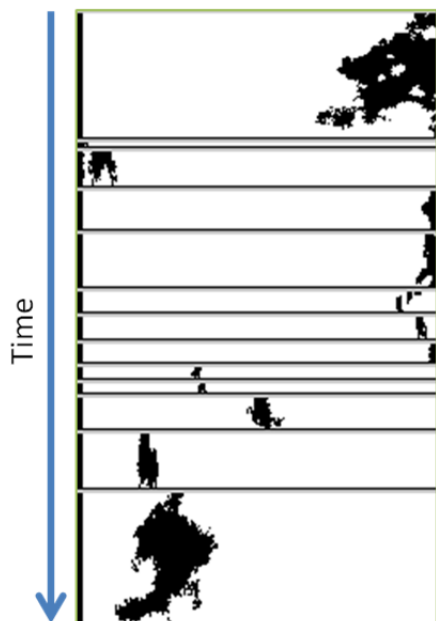


Fig. 4: LLD128 による降雪粒子画像例

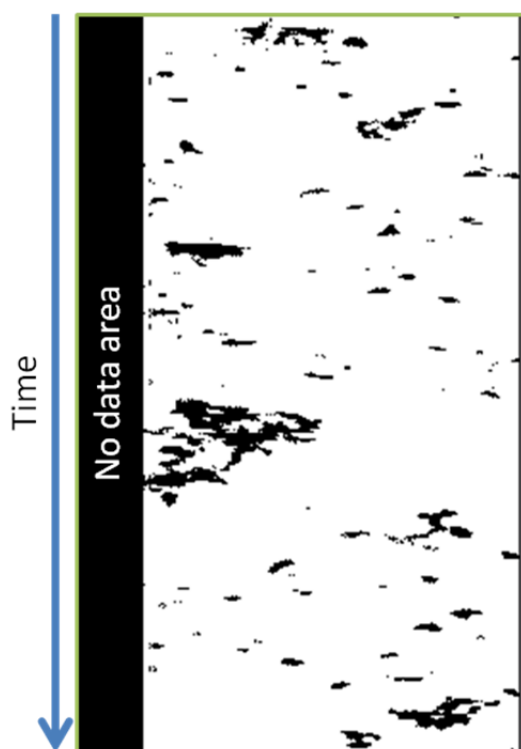


Fig. 5: LLD384-2LD による降雪粒子画像例

LD 駆動回路の片側が停止したため、画像の片側は取得不能となり、有効幅は約半分である 25 mm (200 pixel) となった。したがって、計測幅は LLD128 の約 1.6 倍となった。画像エッジに映る降雪粒子もあるが、その全体の撮像に成功している。

4.2. 結果

双方により取得された画像から粒子数、および画像エッジに映った粒子個数を計数し、粒子取得総数とエッジ検出率により評価を行った。例として 02/09 の結果を挙げる。

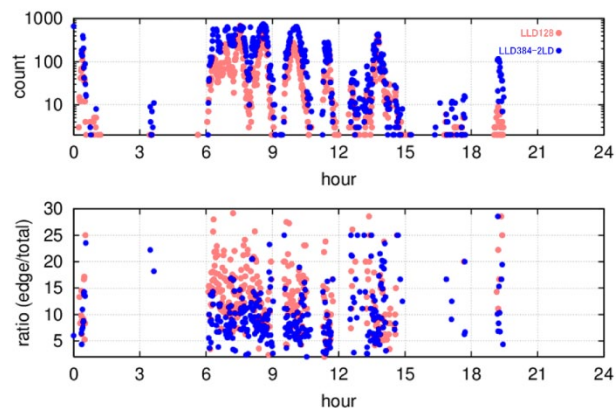


Fig. 6: 粒子取得総数とエッジ計出率の比較(02/09)

02/09 では含水率が高く、粒径が大きい降雪が観測された。検出個数、エッジ検出率ともに LLD384-2LD が良い結果となった。

以上より降雪観測に対しては LLD384-2LD の粒子取得数、およびエッジ検出率の改善が見られ、計測幅拡幅の有効性を確認し、LPD の全ての画素を使用する事により、さらなる性能向上が予想される事が分かった。

5. 1LD 方式の開発

2LD 方式では双方の光源によるシート光重複部分、もしくはシート光が届かない領域が発生する。したがって、LD とレンズを 1 組に限定する必要があり、レンズにシリンドリカルレンズを用いた LLD を製作した。内部構造を Fig. 7 に、仕様を Table 2 に示し、本方式による LLD を LLD384-1LD と称する。

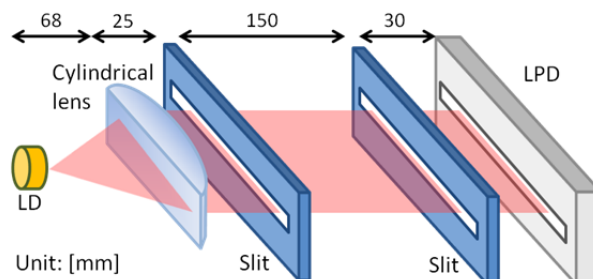


Fig. 7: LLD384-1LD 概要

Table 2: LLD384-1LD 仕様

Name	Value
LD wavelength [nm]	780
LD power [mW]	< 10
Lens [mm dia.]	25
Light sheet width [mm]	≒ 50
LPD resolution [μm]	125
LPD pixel number [pixel]	384
Slice rate [kHz]	12
Sampling area (W×D) [mm]	48×130
Sampling aperture (W×D) [mm]	150×130

5.1. 山形県蔵王における降雪試験観測

LLD384-1LD の降雪試験観測を山形県蔵王にて 2014/01/14 から 2014/01/27 まで行った。LLD の設置状況を Fig. 8 に示す。

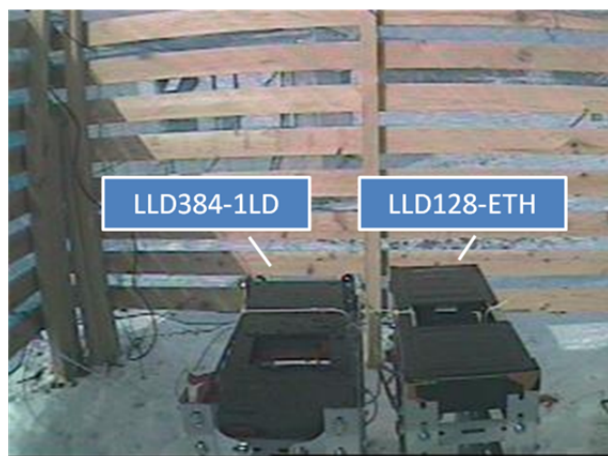


Fig. 8: LLD の配置状況

なお、LLD128-ETH、LLD384-1LD の双方により降雪粒子が観測された日時は 01/15 から 01/23、01/26、01/27 の合計 11 日間であった。

5.2. 比較対象

Table 3: LLD128-ETH 仕様

Name	Value
LD wavelength [nm]	780
LD power [mW]	< 10
Lens [mm dia.]	25
Light sheet width [mm]	> 21
LPD resolution [μm]	125
LPD pixel number [pixel]	128
Slice rate [kHz]	22
Sampling area (W×D) [mm]	16×130
Sampling aperture (W×D) [mm]	150×130

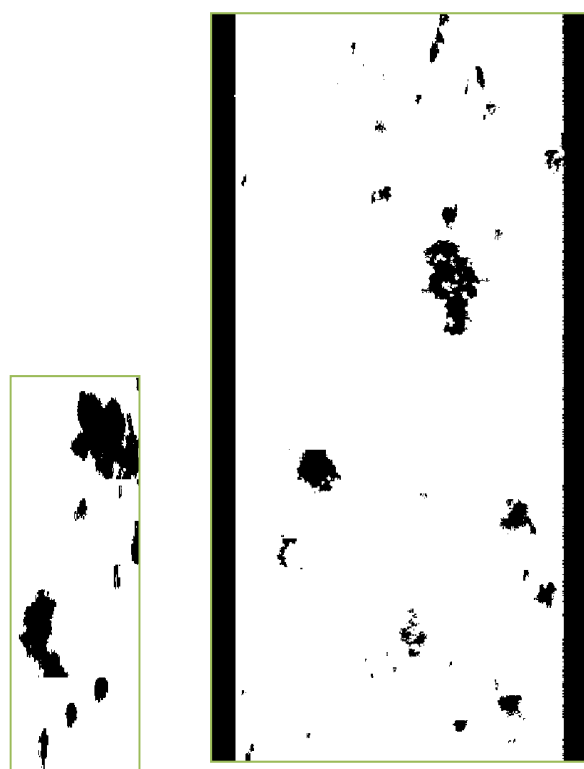
比較対象として、LLD128 を基に LLD128-ETH を製作

した。LLD128-ETH の仕様を Table 3 に示す。

通信方法は Ethernet (UDP)、給電方法は PoE を使用し、開口部の大きさ、データ送信シーケンスを LLD384-1LD と同一にした。これにより計測幅幅のみによる粒子取得性能の評価を可能とした。

5.3. 結果

1/19 08:09JST における LLD128-ETH によって得られた降雪粒子画像例を Fig. 9 (a)に、LLD384-1LD によって得られた画像例を Fig. 9 (b)に示す。



(a) LLD128-ETH

(b) LLD384-1LD

Fig. 9: 降雪粒子画像例

LLD128-ETH に映った粒子は縦長になり、下端が途切れた粒子が存在する。これは LLD384-1LD と比較してスライスレートが高く、計測ライン数上限に達したためである。LLD384-1LD は LD の光出力低下により、画像両端は影になり利用不可能となった。有効計測幅は約 41 mm (329 pixel) となった。したがって、計測幅は LLD128-ETH の約 2.6 倍となった。

LLD384-1LD の画像には連続した縦線が出現する場合が見られた。画像エラーの例を Fig. 10 に示す。

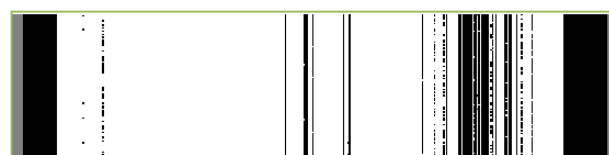


Fig. 10: LLD384-1LD のエラー画像例

この画像エラーは常時影になる部分が発生した場合に現れるものである。線の幅から光学系への付着物とは考えられないため、シート光の強度が揺らいだ、もしくはLPD出力電圧が2値化閾値の付近で揺らいだと考えられる。

また、UDP はパケットの受信成功を検知しないため、受信側でパケット損失が発生する可能性がある。画像データは分割して送信されるため、得られたデータからパケット総数、脱落パケット数、およびパケット損失率を算出した。双方の比較を Fig. 11 に示す。

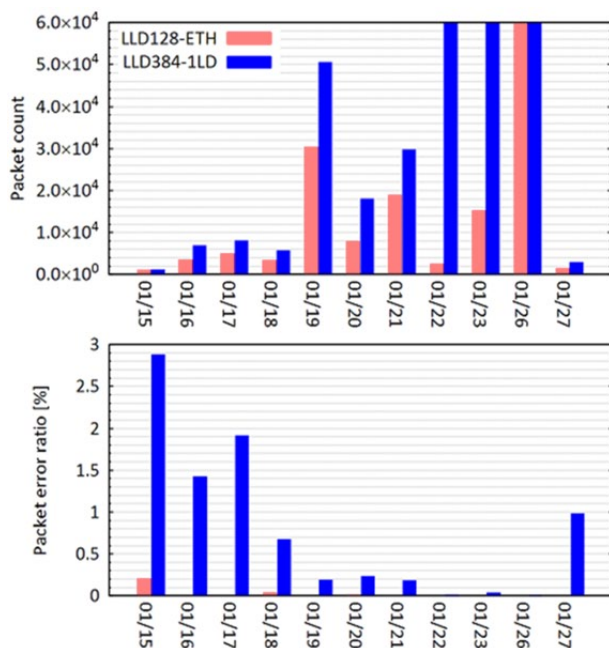


Fig. 11: パケット総数とパケット損失率の比較

LLD128-ETH のパケット損失率はほぼ 0 %に対し、LLD384-1LD に関しては約 23 %から約 34 %であった。LLD128-ETH と LLD384-1LD のデータ分割容量は同一であるが、送信される画像あたりの最大パケット数はそれぞれ 3 packet、8 packet である。この事から送信されるデータの総数が多い事により、パケットが脱落する確率が上がり、同時にパケット損失率も高くなったと考えられる。

なお、01/22、01/23、01/26 にかけて LLD384-1LD のパケット総数が多くなったのは、前述の画像エラーが発生したためである。

同様に、粒子取得総数とエッジ検出率を算出した。双方の比較を Fig. 12 に示す。

全ての日付を通し、検出総数とエッジ検出率ともに LLD384-1LD が良い結果となった。LLD128-ETH のエッジ検出率は約 45 %から約 20 %、LLD384-1LD は約 1 %から約 2 %であり、LLD384-1LD は低く抑えられた。

また、双方におけるエッジ検出個数の比を Table 4 に示す。なお、01/22、01/23、01/26 のデータは信頼できないため排除した。

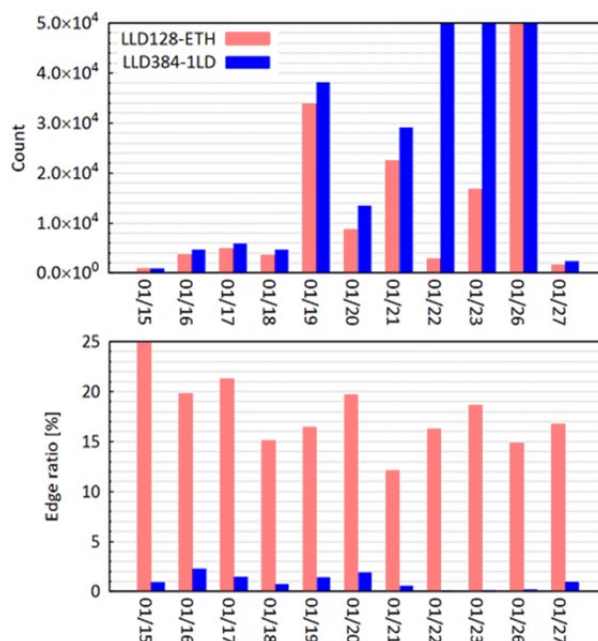


Fig. 12: 粒子取得総数とエッジ計出率の比較

Table 4: エッジ検出個数比

Date	Edge count ratio (LLD128-ETH/LLD384-1LD)
01/15	52.6
01/16	8.9
01/17	15.1
01/18	22.3
01/19	11.7
01/20	10.5
01/21	22.6
01/27	18.3
Average	20.3

平均値は 20.3 倍であり、有効ピクセル幅の比(2.6 倍)よりも大きい値となった。

以上より、降雪観測に対しては LLD384-1LD の計測幅 41 mm (329 pixel) で対応できたとと言える。

6. まとめ

計測幅 16 mm の LLD128 から拡幅を行った LLD を 2 光源型の LLD384-2LD と 1 光源型の LLD384-1LD の 2 種を製作した。

LLD128 と LLD384-2LD の同期降雪観測では片方の光源が停止したため、計測幅が約 25 mm となったが、LLD128 と比較して概ね降雪粒子の全体像を確認でき、平均エッジ検出率は LLD128 が約 21 %、LLD384-2LD が約 10 %となった。この事から拡幅によるエッジ検出率の改良に成功したと言える。

LLD384-1LD の観測では、比較用の LLD128-ETH を製作し、計測幅の拡幅によるエッジ検出率の改良効果確認を行った。LLD384-1LD は光源の光出力低下が発生し、有効計測幅は約 41 mm (329 pixel)となったが、平均エッジ検出率は LLD128-ETH が約 21%、LLD384-1LD が約 1.2%であり、降雪観測に対して十分な画像幅である事を示した。しかし、画像データの送信中においてデータの脱落が発生した。これはデータの圧縮により回避可能と考えられる。

課題として、降雪粒子は降水粒子と違い、撮像方向により形状が変わるため、他方向から形状を観測できるよう改良する必要がある。また、気球観測のため、筐体構造の軽量化および無線通信方法の検討が必要である。

参考文献

- 1) H. Minda, T. Makino and N. Tsuda, "Performance of a new low-cost laser disdrometer with rainfall intensity correction in heavy rainfall," IEEJ Paper Vol. 133, 2013.
- 2) R. P. Lawson, 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," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 23, no. 11, 2006.
- 3) N. Bringi and V. Chandrasekar, "Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications," Cambridge University Press, 2001.
- 4) A. Kruger and K. F. Witold, "Two-Dimensional Video Disdrometer: A Description," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 19, no. 5, 2002.
- 5) T. Takahashi, "The Videosonde System and Its Use in the Study of East Asian Monsoon Rain," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 91, no. 9, 2010.

(受理 平成 26 年 3 月 19 日)