

粒子形状計測用レーザラインスキャナの開発 Development of laser-line scanner for particles shape measurement

近藤 泰典[†], 山口 剛^{††}, 津田 紀生^{†††}, 民田 晴也^{††††}
Yasunori Kondo[†], Tuyoshi Yamaguchi^{††}, Norio Tsuda^{†††}, Haruya Minda^{††††}

Abstract Snowfall has been observed by precipitation radar. Observation performance of rain is getting better. However, observation of snowflake makes slow progress. The snowflake has the differential shape and the water content ratio. For resolution of these problems, direct measurement of particle shape and particle size has been investigated. In this study, the observation system is developed for measuring particle shape and particle size using laser line scanning method.

1. 緒言

降水レーダはリアルタイムで広範囲の降水分布を観測できる利点があるが、レーダは降水量を直接観測できず、レーダ観測空間に存在する降水粒子の後方散乱断面積を積算した値であるレーダ反射因子を計測する。⁽¹⁾

高精度な降水強度推定のためには、後方散乱断面積と粒径分布が必要である。含水率100%で回転楕円体近似できる雨滴粒子の後方散乱断面積は理論的に厳密解を得ることができ、落下速度が速い雨滴粒子は地上観測雨滴粒径分布による比較検証が可能であり高精度化は進んでいる。対して、降雪粒子は形状や含水率が千差万別であり、理論的に後方散乱断面積を得る手法も確立できていない。更に、落下速度が遅い降雪粒子は、地上観測と上空での粒子物性が同じ保証はなく、レーダ降雪強度の地上検証を難しくしている。上空での粒子観測を目標に、軽量、低コストで、使い捨て運用可能な半導体レーザを光源にした光学雨滴粒径分布計 Low-cost Laser Disdrometer (LLD)を開発した。^{(2),(3)}実際に飛翔することはなかったが、その後、地上降雪観測機器として開発を継続、LLD,⁽³⁾ Parsivel⁽⁴⁾と同期観測実験を実施した。その結果、Parsivelと同等の粒径分布と落下速度分布計測能力を確認した。

Parsivel は存在し得ない落下速度が速い小粒子を出力

するが、LLD は排除可能であり、粒子形状を提供できる利点がある。現在、複雑な降雪粒子の立体形状を計測するため、4台のLLDを45度間隔に配置した機器を開発している。立体形状を取得することにより、実在に近い形状でマイクロ波散乱計算を実施することができ、レーダ降雪強度の実用化に向け、後方散乱断面積の厳密解を得て、粒子等価直径とのデータベースを作成することで、レーダ降雪強度推定の近似手法の開発が可能となる。⁽⁵⁾

2. 観測原理

本装置は、光源であるレーザダイオード(LD: Laser Diode)、シート光を作り出す球面平凸レンズ、受光部となるラインフォトダイオードアレイ(LPD: Line Photo Diode array)から構成された1次元ラインスキャナである。Fig.1にラインスキャナ部分の概略図を示す。LDから平凸レンズに向けて照射したレーザ光は球面平凸レンズを使ってシート光とし、LPDに常に照射した状態とした。シート光中に粒子が浸入するとLPD上に通過中の粒子の影ができ、その影の部分のみLPDからの出力電圧が下がる。この電圧の変化を連続的一定の速度で読み取り、粒子を1ラインごと順番にスライスするようにして粒子のシルエットの取得を行う。シート光を平行ビームとしておくことで落下してきた降雨粒子の幅と影の幅を一致させ正確な測定を行った。粒子は下側からスキャンされていくため実際の粒子とは上下が反転した状態で撮像される。LPDからのアナログ信号はコンパレータを介して2値化し、FPGAにより取得した。所得したシルエット

† 中部日本マルコ(株) (小牧市)
†† 三菱スペース・ソフトウェア(株) (名古屋市)
††† 愛知工業大学 工学部 電気学科 (豊田市)
†††† 名古屋大学 宇宙地球環境研究所 (名古屋市)

のデータを FPGA 内でパケット化し Ethernet を用いてパソコンに送信する。送信されたパケットは測定時間ごとにバイナリデータとして保存した。その後、パソコン上にて処理を行い画像化や立体再現、粒径分布の算出、速度の算出といった処理を行った。

実際に装置に使用した LD は SANYO 製レーザダイオード DL-4140-001S である。Chart. 1 に DL-4140-001S のスペックを示す。雨滴粒子の陰影計測の感度向上のため水による吸収効率が比較的高い近赤外の波長を実験に利用した。またこのレーザは、小型装置でも大きな観測範囲を得るために必要な、レーザ広がり角の広いという条件も満たしている。LD の発振出力は光出力自動制御回路である APC(Auto light-Power Control circuit)半導体素子を利用し、光出力は 20mW とした。

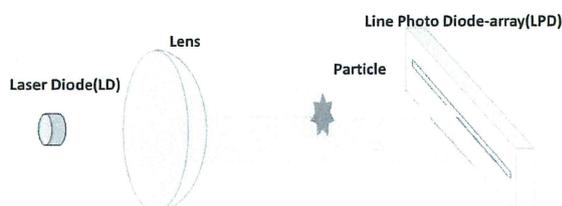


Fig. 1 Schematic of laser-line scanner

Chart. 1 Spec of DL-4140-001S

発振波長	785nm
発振開始電流	30mA
最大光出力	25mW
水平広がり角	8°
垂直広がり角	25°

3. 観測装置概要

観測に使用した装置は原理で述べたラインスキャナを 4 つ 45°おきに並べた構造である。Fig. 2 に装置の概略図を示す。Fig. 2 において、観測エリアとして示すように粒子を観測できる範囲は 1 辺 40mm の八角形である。しかし、立体形状の再現を行なうためには 4 つのラインスキャナ全てで同一の粒子を観測する必要があるため立体再現が可能なエリアは中心の 1 辺 13mm の八角形となる。

Fig. 3 に実際の配置図を示す。長方形のモジュールが投光部であり凸型のモジュールが受光部である。ラインスキャナを 4 つ用意した理由は粒子の立体形状の再現を行なうためである。以前はラインスキャナ 1 つで観測を行っていたがこれでは粒子を一方向からしか捉えられず粒子の実際の形状を得ることは困難であった。この問題の解決として複数方向から粒子を 2 次元画像として取得し、それらを組み合わせ粒子のおおよその立体形状を再現する方

式を採用した。

ラインスキャナのスペックを Chart. 2 に記す。4 つのラインスキャナそれぞれ ch1, ch2, ch3, ch4 と番号が割り振られている。ch1 と ch2, ch3 と ch4 がそれぞれ直角になるように配置した。ラインスキャナ上面を覆う蓋には八角形の穴を設けた。この穴の内部に粒子が侵入し、シート光にかかった粒子のシルエットを撮像した。ch1 と ch2 を計測時のトリガとし、この 2 つのラインスキャナどちらかに粒子が侵入した際に撮像が開始される。これは立体再現が不可能なデータの取得を少しでも抑えるためである。

各ラインスキャナ事に高低差を設けた。この結果、粒子の通過時間に差が生まれそこから粒子の落下速度を求める事が可能である。本装置では、粒子がシート光の内部を通過する様子を一定の間隔で取得するため落下速度により粒子のシルエットの鉛直方向の大きさが変化してしまう。この補正を行なうため落下速度の算出が必要である。また、落下速度は粒子種別の判定にも利用できる。高さの差は ch1 と ch2 が最上位にありそこから 1mm 下方に 3ch、2mm 下方に 4ch となるように設計した。

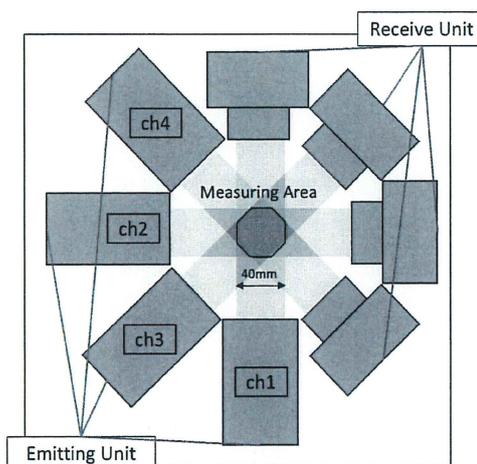


Fig. 2 Schematic of line scanner

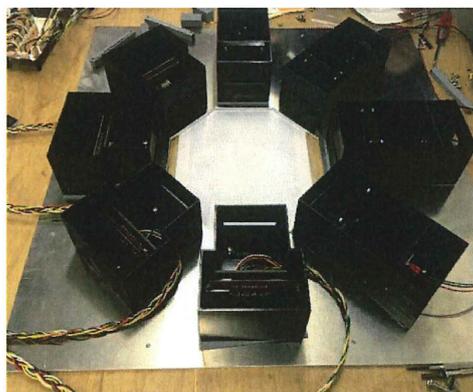


Fig.3 Layout of line scanner

Chart. 2 Spec of line scanner

LD 光出力	20wW
シート光幅	40mm
水平方向分解能	125 μ m
フォトダイオード数	384
スライスレート(計測速度)	20kHz

4. ラインスキャナ制御

ラインスキャナの制御には FPGA を使用した。今回使用した FPGA は Xilinx 社製 Zynq-7000 でありこれを搭載した Digilent 社製開発ボード ZYBO を利用し、ラインスキャナの制御と外部との信号の入出力、PC への観測データの転送を行なった。Zynq-7000 シリーズは内部的に processing system(PS)と programmable logic(PL)に分けられ互いに情報の伝達を行ない、それぞれが割り当てられた処理を並列して行なうことが出来る。今回は PL 側が LPD の制御とデータの取得を担当しており PS 側は UDP パケットの作成と LAN によって接続された PC との UDP 通信を担当している。Fig. 4 に FPGA 内に構成した回路の簡略図として示す。図中左側の点線内が PL による制御部であり右側点線内が PS による制御部である。PL から送信された LPD 制御信号により LPD を動作させ影を観測されると粒子のスライスデータが 2 値データとして PL に送られる。PL は送られてきたスライスデータを FPGA 内の仮想的メモリである BlockRAM に格納する。一定のスライスデータが BlockRAM に格納されると PL は PS に対して PC へのデータ送信要求を送る。送信要求を受けた PS は AXI バスを介して BlockRAM からスライスデータを受け取り UDP パケットの作成を行なう。

Fig. 5 は PL 側を状態遷移図にしたものを示したものである。PL は状態遷移図に示す 8 つの状態を持ち状況によって状態が変化する。4 つあるラインスキャナ全てを同時に制御している。以下にそれぞれの状態における処理を説明する。

lpd_rst は BRAM のアドレスとスライス通し番号、LPD 駆動用クロック、BRAM の書き込みと読み込みフラグのリセットを行う。電源の on やデータ送信が終わり新たなデータ所得が可能になった際にこの状態となり観測装置の初期化を行う。処理が終わり次第 lpd_mask に移行する。

lpd_mask と lpd_mask_cnmf は BRAM 読み込み中のフラグ立てを行った後、マスクデータを取り出す。マスクデータの読み出しの完了を確認した後、BRAM 読み込み中フラグを off にし次の lpd_trg に移行する。

lpd_trg は PS から送られてくるデータ送信完了のフラグを確認し送信中の場合は送信が完了するまで待機する。送信の完了が確認でき次第、スライス所得フラグを立て装

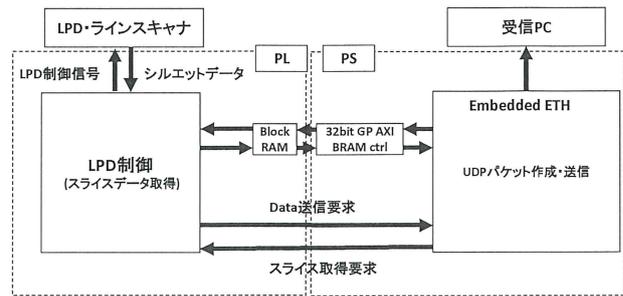


Fig. 4 Schematic of circuit architecture

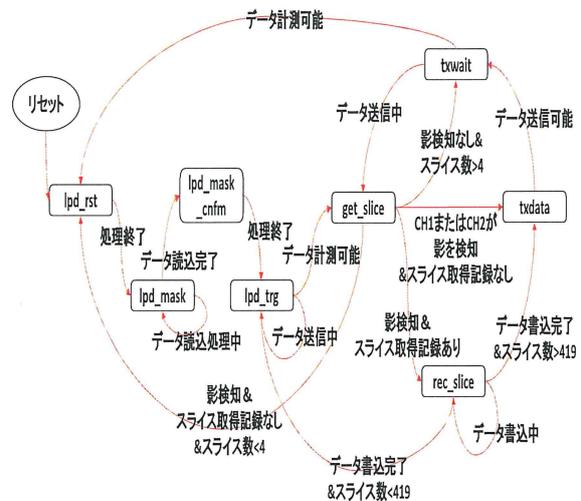


Fig. 5 State change diagram

置において測定可能な状態にした後、次の状態 get_slice に移行する。

get_slice は LPD の制御トリガ信号 SI を送信し、各ラインスキャナにおいて 1 スライスずつのデータ取得を行う。影を検知した場合にデータが転送中でなければ、rec_slice へ遷移する。データ転送中であるならば txwait に遷移する。粒子がシート光内を抜けたなど影が映らなくなった場合、スライス取得記録があるか、ch1 と ch2 が影を検知したかどうかの判断を行う。記録があることの判断が出来次第 txdata へ遷移する。影の検知が無く、スライスの取得記録も無いときは lpd_rst へ遷移し観測装置の初期化を行う。

rec_slice は get_slice において取得したデータを BRAM へ格納する。書き込み完了後、スライスの通し番号、影を検知したラインスキャナのみのスライス番号のカウンタ、BRAM アドレスの更新を行う。取得したスライス数が一定の数を越えていない場合、lpd_trg に遷移し続けて観測を行う。スライス数が一定量を超えた場合、PS に対してデータの送信要求を行い、状態は txdata へ遷移する。

txdata はデータ送信中においても LPD を停止させないようデータ送信中 LPD の動作継続処理を行いつつ PS からのデータ送信完了信号を待つ。LPD が停止後に再度起動した直後の動作が不安定であったことからこの処理を設けた。この際データの取得は行っていない。データ送信の完了が判断できるとデータ送信要求フラグを初期化し、状態を txwait へ遷移する。

txwait は PS からのデータ送信完了フラグが確認できるまで LPD が動作を続けるよう信号を出し get_slice に遷移しデータの取得を継続する。データ送信完了フラグが確認されるとデータ送信中 LPD の動作継続処理をリセットし lpd_rst へ遷移する。

以上の 8 つの状態が移り変わりながら PL はラインスキャナを制御する。

Fig. 6 に PS 側における UDP パケットの作成・送信部のフローチャートを示す。PS は PL からのデータ送信要求を受けると UDP パケットの作成を行い、観測装置にて取得したデータの送信を行う。この際、画像化した後にどのラインスキャナで取得した画像か判断できるように画像にマーカーを挿入する処理も設けている。IP パケットは IPv4 プロトコルに沿って作成され UDP マルチキャスト形式で送信される。

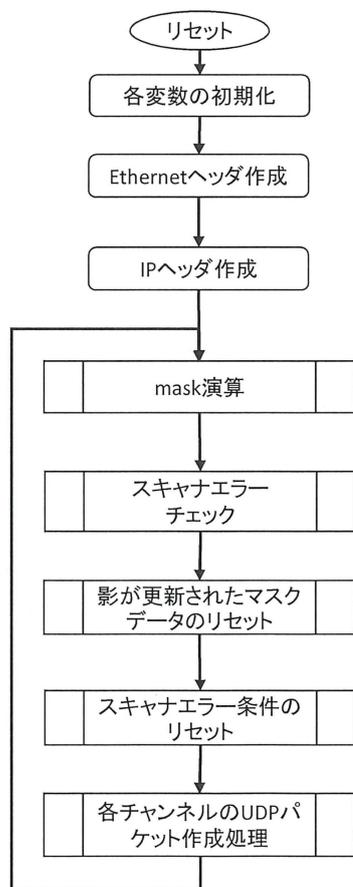


Fig. 6 Flow chart of PS

5. 観測画像例

ラインスキャナ斜め上方向から USB カメラで粒子を撮影する手法で粒子形状の取得も同時に行なった。Fig. 7 に同一方向から USB カメラとラインスキャナによって撮像された粒子の比較画像を示す。ラインスキャナによる画像は上下を反転させてある。観測された粒子の形状から同一の粒子であることは確認できるが光源の光出力が強すぎたため粒子形状を細かく捉えられない問題とカメラの設置角度が浅く、上方向からの形状を捉え切れていない問題が発生した。

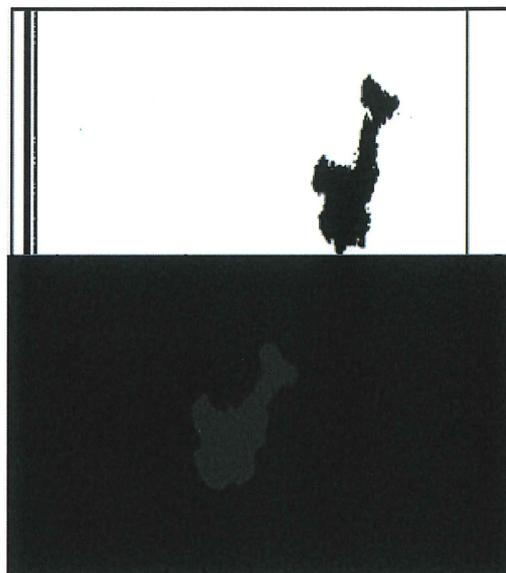


Fig. 7 Line scanner and USB camera images

6. 観測結果

Fig. 8 に 2015 年 3 月 10 日に観測したデータより粒子径と落下速度を算出しグラフとしたものを示す。粒子幅は有効範囲内に存在する最大粒子幅の平均値、落下速度は各 ch で最初に検出したスライスから算出し、複数の粒子を検出した場合も一番若いスライス番号から算出したため厳密に計算したものではない。グラフ中に引かれているラインは気象学において経験的に得られたものであり雨滴の落下速度と粒子サイズの関係を表したものである。雨滴の粒子径と落下速度の関係はこのラインの付近に集まって分布する。3 月 10 日は雨からみぞれに移り変わったことが観測されている。雨であった 6 時から 9 時までのデータを見るとライン周辺にまとまって分布していることがわかる。みぞれが降り始めた 10 時以降には落下速度 4m/s 以下に多く分布し観測される粒子径が幅広いものとなった。雨が降っていた時間帯ではほとんど見られなかった粒子径 10mm 以上のものも観測されるようになったことが分かる。このことから厳密な速度計算ではないが本装

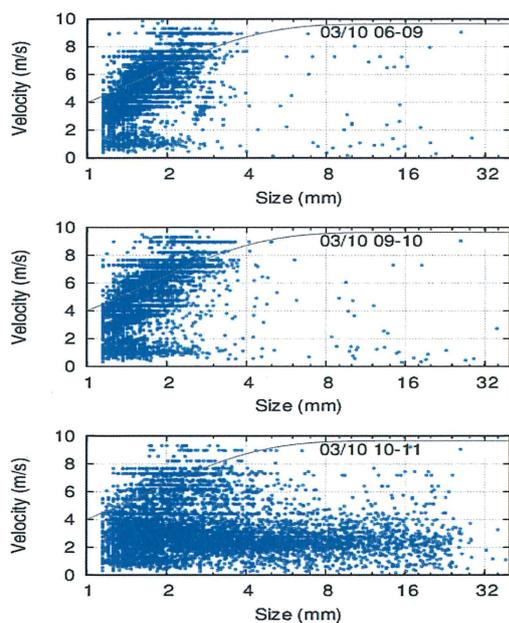


Fig.8 Particle fall velocity vs. particle size

置によって得られたデータより算出した落下速度からも異なる降雨・降雪現象の判断が可能であるといえる。

7. 総括

4つのラインスキャナを用いて複数方向から粒子を観測することで粒子形状と粒径分布、落下速度を直接観測できる機器の開発を行ない実際に北海道札幌において観測を

行なった。粒子のシルエットと簡易ではあるが落下速度の算出、粒子の立体形状の再現画像をもとに本観測装置において異なる降雨・降雪現象の判断を行なうことが可能であることが確かめられた。

今後は、粒子立体形状の再現アルゴリズムの改良と精度評価や粒径分布の評価、粒子種別判定の自動化アルゴリズムの開発、立体形状再現からのマイクロ波後方散乱断面積の計算を行なっていく必要がある。

謝辞

本研究は科研費(26400464)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) N. Bringi, and V. Chandrasekar, Polarimetric Doppler Weather Radar: Principals and Applications. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp.636, 2001
- 2) Minda, H., and N. Tsuda, Low-cost laser disdrometer with capability of hydrometeor imaging, IEEJ TEEE, 7(S1), pp.132-138, 2012
- 3) Minda, H., T. Makino, and N. Tsuda, Performance of a new low-cost laser disdrometer with rainfall intensity correction in heavy rainfall, IEEJ TEEE, 9(9), pp.542-547, 2014
- 4) M. Löffler-Mang, and J. Joss, An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors, J. Atmos. Oceanic. Technol., 17, pp.130-139, 2000
- 5) Minda, H., T. Makino, N. Tsuda, and Y. Kaneko, Performance of a laser disdrometer with hydrometeor imaging capabilities and fall velocity estimates for snowfall, IEEJ TEEE, (accepted), 2016