

コヒーレントドップラーライダーによる雨滴粒径分布の鉛直プロファイル推定 Estimation of vertical profile of raindrop size distribution by using coherent Doppler lidar

青木誠, 岩井宏徳, 中川勝広, 石井昌憲, 水谷耕平

Makoto Aoki, Hironori Iwai, Katsuhiko Nakagawa, Shoken Ishii, and Kohei Mizutani

情報通信研究機構

National Institute of Information and Communications Technology (NICT)

Abstract: Accurate measurements of the raindrop size distribution (DSD) profile are important for many applications in meteorology, hydrology, and related sciences. Vertical profile of DSD was estimated by Doppler spectra observed with 1.5 μm coherent Doppler lidar at NICT Okinawa during a rain event. A Gaussian mixture model was used to split the Doppler spectrum into radial wind and precipitation components and then the DSD was derived from the Doppler spectrum arising from precipitation using a relationship between raindrop size and terminal rainfall velocity. The 1-min-averaged DSD retrieved from the Doppler spectrum at the first lidar range gate is in excellent agreement with that measured with a co-located ground-based disdrometer. These results lead us to conclude that coherent Doppler lidar has great potential for accurate measurement of DSD profiles in atmospheric boundary layer.

I. はじめに 雨滴粒径分布 (DSD) の鉛直プロファイルを正確に計測することは、気象学や水文学における重要な課題の一つである。降雨レーダによって観測される降雨強度は、DSD を仮定しており、DSD の正確な測定は、気象レーダや衛星搭載の降水レーダの降水量推定精度の向上に繋がる。また、雲物理過程の理解、雨滴の成長モデルの検証等にも有効である。一般的に、DSD は地上設置型のディストロメータで観測される。しかしながら、DSD は時間と高度によって刻々と変化するため、DSD 鉛直プロファイルを正しく計測するためには、地上観測だけでは不十分である。

ドップラーライダーは、大気中のエアロゾルからの後方散乱信号のドップラーシフトを解析することで、晴天時に三次元風分布を観測する装置であるが、降雨時に鉛直上向きの観測を行うと、エアロゾルからの後方散乱信号に加えて、雨滴からの散乱信号を受信することができる。二つの信号は分離したピークを持つために、雨滴からの散乱信号のみを取り出し、雨滴の落下速度および DSD を推定することができる。ドップラーライダーの最下層のスペクトルから推定された DSD は、地上の雨滴計と同程度の精度で測定できることも確かめられている[1]。

本研究では、コヒーレントドップラーライダーによる DSD 鉛直プロファイル推定について報告する。

II. 観測および解析手法 本研究では、情報通信研究機構 (NICT) が、局地的大雨や突風等の局地現象の予測と被害の軽減を目指して、沖縄 (沖縄県恩納村) に設置したフェーズドアレイ気象レーダ・ドップラーライダー融合データシステム (PANDA) の 1.5 μm 帯ドップラーライダー (WINDCUBE400S, LEOSPHERE) を用いた。ドップラーライダーで、降雨時に鉛直観測 (1 秒間積算・レンジ分解能 100 m) を実施して、観測されたドップラーспекトルから DSD を推定した。また、推定された DSD との比較を行うために、ドップラーライダーの近く (東に約 150 m) にディストロメータ (RD-80) およびマイクロインレーダ (MRR) を設置して同時観測を行った。

降雨時にコヒーレントドップラーライダーで鉛直観測を行うと、図 1 に示すように、大気中のエアロ

ゾルおよび降雨粒子からの散乱信号によって、少なくとも二つのピークを持つドップラーспекトルが観測される。観測されたспекトルは、エアロゾルからの散乱によるспекトル (大気спекトル: S_{air}) と雨滴からの散乱によるспекトル (降雨спекトル: S_{rain}) によって、

$$S(v) = S_{air}(v) + S_{air}(v) * S_{rain}(v) + n \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 n はノイズフロア、 $*$ は畳み込み積分を表す。大気спекトル (S_{air}) は、

$$S_{air}(v) = A \exp\left[-(v - v_d)^2 / (2\sigma^2)\right] + n \quad (2)$$

ガウス分布で近似する。ここで、 A はガウス分布の大きさ、 v_d (m s^{-1}) は鉛直流、 σ (m s^{-1}) はспекトル幅を表す。降雨спекトル (S_{rain}) は、

$$S_{rain}(v) = C \cdot N(D) \cdot D^\kappa \cdot \frac{dD}{dv} \quad (3)$$

と表される。ここで、 C はライダーの諸定数から求まる定数、 $N(D)$ ($\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$) は DSD、 D (mm) は雨滴の直径、 κ は雨滴の散乱機構によって決まる定数を表している[2]。式 3 は DSD の情報を含んでいるので、式 2 を用いて大気спекトルを近似して、式 1 を用いて降雨спекトルを分離すると、そのспекトルから DSD の情報を取り出すことが可能である。本研究では、ウ

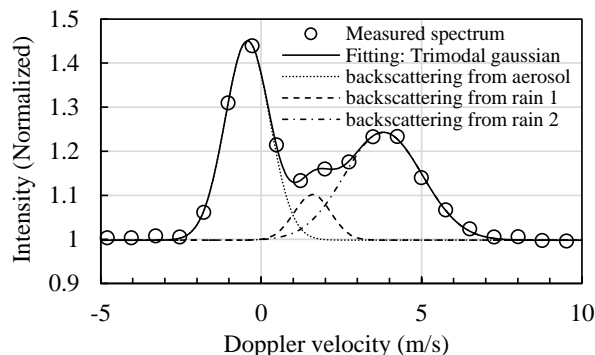


Fig. 1. Coherent Doppler lidar spectrum obtained during a rain event (open circles) and fitting curve (solid line) calculated with the Gaussian mixture model at the first lidar range gate (200 m AGL) at NICT Okinawa at 22:22:30 JST on 3 June 2015. Dotted line shows the spectrum owing to backscattering from aerosol. Dashed and dash-dotted lines show spectra owing to backscattering from raindrops. Positive and negative Doppler velocities case in the directions towards and away from the lidar, respectively.

インドプロファイラによる DSD 推定手法の一つである Kobayashi and Adachi (2001) の手法[3]に改良を加えて、コヒーレントドップラーライダーのための DSD 推定手法を開発した。

1. 降雨スペクトルと大気スペクトルを分離するために、Gaussian mixture model を用いて、降雨時のドップラースペクトルを近似する (図 1)。
2. 分離された大気スペクトル (S_{air})、降雨スペクトル ($S_{rain,i=1}$) および式 1 を用いて降雨時のドップラースペクトルを計算する ($S_{calc,i}$)。測定値 (S_{obs}) との比 ($R_i(v)=S_{obs}(v)/S_{calc,i}(v)$) を求める。
3. 観測値との比が、閾値以下とならない時は、降雨スペクトルと比の積を求めて ($S_{rain,i+1}(v)=S_{rain,i}(v) \times R_i(v)$)、降雨スペクトルの修正を行う。2.と 3.の過程を繰り返し、閾値を満たす降雨スペクトル ($S_{rain,i}$) を求める。
4. 降雨スペクトルと式 3 を用いて、DSD を導出する。ここで、雨滴直径と落下速度の関係式は、Gunn-Kinzer の経験式[4]を用いた。

Ⅲ. 観測結果 図 2 に 2015 年 6 月 3 日 22 時 22 分 26 秒 (弱い層状性降雨時: 1 時間雨量 3 mm 未満)、鉛直観測時のドップラースペクトルの鉛直プロファイルを示す。実線で囲まれた範囲にあるスペクトルは大気中のエアロゾルからの散乱によるスペクトル、点線で囲まれた範囲にある広がったスペクトルは雨滴からの散乱によるスペクトルを表している。エアロゾルおよび雨滴からの散乱信号は、高度とともに減少するが、最下層レンジ (200 m) から 1000 m 地点まで、少なくとも二つのピークを持つドップラースペクトルが観測できている。そのため、ドップラーライダーによる DSD 鉛直プロファイルの推定が可能である。

図 3 に、2015 年 6 月 3 日 22 時 22 分に観測された最下層のドップラースペクトルから推定した DSD を示す。推定された DSD は (1 秒毎の推定値を 1 分平均)、Marshall-Palmer (M-P) の式[5]を用いて計算した DSD と非常に良い一致を示している。また、観測地点および観測手法が異なるため、単純に比較はできないが、RD-80 の測定値とも良い一致を示している。

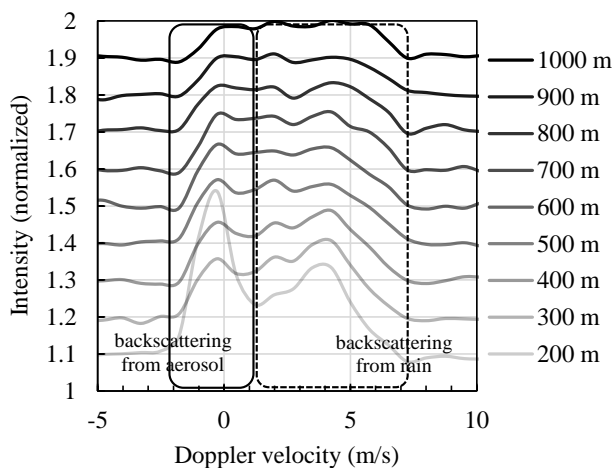


Fig. 2. Vertical profile of Doppler spectrum measured with the 1.5 μ m coherent Doppler lidar at 22:22:30 JST on 3 June 2015.

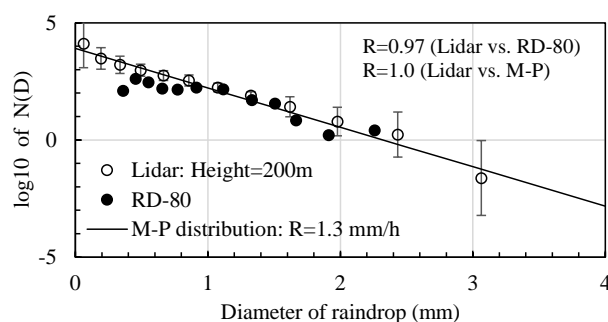


Fig. 3. 1-min-averaged DSD retrieved from Doppler spectra at the first lidar range gate at 22:22 JST on 3 June 2015. The black circles and solid line show DSDs measured with RD-80 and calculated by M-P distribution, respectively.

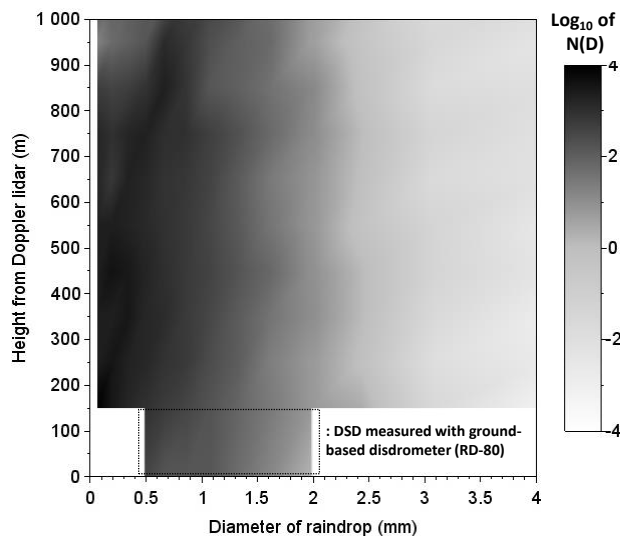


Fig. 4. Vertical profile of 1-min-averaged DSD measured with the 1.5 μ m coherent Doppler lidar at 22:22 JST on 3 June 2015. DSD measured with RD-80 also depicted in the bottom layer

図 4 に、2015 年 6 月 3 日 22 時 22 分に観測されたドップラースペクトルの鉛直プロファイルから推定した DSD の鉛直プロファイルを示す。開発した手法を用いて、最下層のレンジから 1000 m 地点までの DSD の推定に成功した。今回解析した降雨イベントは、降雨強度の時間的変化が小さい層状性降雨だったので、DSD は高さ方向にほぼ一様な分布であった。

Ⅳ. まとめ 降雨時・鉛直観測時のコヒーレントドップラーライダーのドップラースペクトルから DSD を推定する手法を開発した。開発した手法は、同様の観測が行えるウインドプロファイラでは測定が困難な大気境界層内の DSD 鉛直プロファイルの推定に有効である。本研究では層状性降雨のみを解析対象としたが、今後は対流性降雨の DSD 鉛直プロファイルについて調べる。また、地上の雨滴計および MRR で観測した DSD との比較を行い、推定アルゴリズムの精度向上を図る予定である。

参考文献

- [1] 青木他, 日本気象学会 2015 年度春季大会予稿, C307 (2015).
- [2] K. Träumner, et al., *J. Atmos. Ocean. Tech.* **27**, 1095 (2010).
- [3] T. Kobayashi and A. Adachi, *Geophys. Res. Lett.* **28**, 4071 (2001).
- [4] Atlas et al., *Rev. Geophys. Space. Phys.* **11**, 1 (1973).
- [5] J. S. Marshall and W. Mc K. Palmer, *J. Meteor.* **5**, 165 (1948).