

小型降水粒子観測プローブの開発

民田 晴也

教育・研究技術支援室 計測・制御技術系

概要

高精度なレーダ降水強度推定のため、降水粒子種別とその粒径分布 (DSD) のデータベースの充実が必要である。近年、偏波レーダを利用した降水粒子種別判定とDSD推定技術が提案され、その検証として、上空の降水粒子の直接観測の必要性が高まり、現在、小型気球で連続観測を可能にする、軽量、かつ、廉価な降水粒子観測プローブの開発を行っている。本報告では、プローブ概要の紹介と、既存の雨滴粒径分布計との比較検証実験の初期結果を示す。

1 はじめに

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にあるが、その降水強度は大きな推定誤差を含む。レーダ反射因子（観測値）は降水粒子の後方散乱断面積と粒径分布 (DSD) に依存し、レイリー散乱を仮定した受信電力とレーダ反射因子の関係を下記に示す^[1]。

$$P_r = C\eta, \quad \eta = \int \sigma(D)n(D)dD = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \int D^6 n(D)dD = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z$$

P_r : 受信電力(W)、 C : 定数、 η : レーダ反射率、 λ : レーダ波長(m)、 K : 雨滴の誘電定数、 Z : レーダ反射因子($\text{m}^6 \text{m}^{-3}$)、 $\sigma(D)$: 後方散乱断面積(m^2)、 $n(D)$: DSD(m^{-4})、 D : 粒子直径(m)。

レーダ反射因子 Z ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$) から降水強度 R (mm h^{-1}) への換算は、平均的な DSD を仮定した経験式 (Z - R 関係) を適応するが、DSD 時空間変動は激しく、DSD ミスマッチによる推定誤差を生じる^[2]。高精度なレーダ降水強度推定には DSD 情報が必要であり、地上観測 DSD とレーダ反射強度の比較検証が行われてきた。代表的な地上 DSD 観測機器として、運動量検出型^[3]、光学式 disdrometer^{[4][5]}がある。現業のレーダ降水強度補正手法としては、気象庁レーダアメダス合成（地上雨量計ネットワークを用いた降水強度補正）^[6]がある。

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、DSD の遠隔計測（推定）技術の開発であり、代表的な DSD 推定技術は次の 3 手法がある。(1) vertical pointing Doppler radar の粒子落下速度スペクトルを利用する手法^{[8][9]}。(2) マイクロ波散乱の周波数特性を利用した多周波レーダ^{[10][11]}。(3) 偏波レーダ (POL: Polarimetric radar) の偏波シグナルを利用した DSD 推定^[12]。POL 偏波パラメータは、降水粒子種別判定（雨、雪、霰など）^{[1][13]}や降雨減衰量計測^{[1][14]}にも利用できる。降水粒子種別は後方散乱断面積を決める要素であり、液層で球形・楕円体近似ができる雨滴に対しては理論的・観測的に理解が進んでいるが、雪など固体降水粒子(特

に誘電率の大きな融解粒子)の散乱特性の知見は不十分であり、重大な研究テーマの一つである。また、降雨減衰を受けやすい短波長レーダ(X-band以上)では、減衰量が得られるインパクトは大きい。このように、高精度レーダ降水強度、降水粒子種別判定技術を検証するため、上空に存在する降水粒子の形状(種別)とDSDの直接観測技術の向上の必要性が高まっている。

レーダビーム内の同期観測は、航空機と気球観測がある。航空機の飛行速度でもサブミリ分解能で形状計測できるレーザプローブが存在する^[15]。航空機観測は、安全飛行できる降水セルに対して高い自由度で観測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、航空機観測に比べ安価であり、現在、ビデオゾンデ^{[16][17]}とPOLの同期観測が行われている^[18]。ビデオゾンデは粒子種別判定には有効な機器であるが、カメラ撮影のため計測粒子数が少なくDSD評価(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、小型気球で連続観測を可能にするため、軽量、かつ、廉価な降水粒子観測プローブ(PROBE)の開発を行っている。現在、地上観測機器として安定性の向上と性能評価を行っている。

2 降水粒子観測プローブと検証実験概要

2.1 プローブ概要

図1にPROBEの外観(長さ40 cm、幅10 cm)、表1に主要諸元を示す。図2に計測原理の模式図を示す。本プローブはシート光を通過する降水粒子の影を高速スキャンし降水粒子の形状計測を行う。光源は近赤外半導体レーザ(780 nm)とシート光を生成する非球面レンズから構成され、影検出部は、128素子のLine photo diode(幅16 mm、分解能125 μ m)を使用している。現在の構成で、ハウジングを除いたコストは1万円強である。高速落下する雨滴の形状計測には高スライスレートが求められ、現在、128素子の2値化で30 kHz強のスライスレートを確保している。地上観測では30 kHzで落下雨滴に対して7スライス以上の計測が可能であるが、気球観測では上昇するプラットフォームと雨滴の相対速度が速くなり、より高速なスキャンが要求される。PROBEは、気球観測で直径1 mm以上の粒子計測を視野に、40 kHz以上のスライスレートを目標にしている(40 kHzで通過速度10 m/sの物体の鉛直分解能は0.25 mm)。

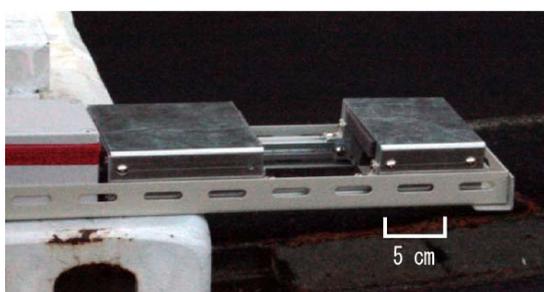


図1 PROBE 外観

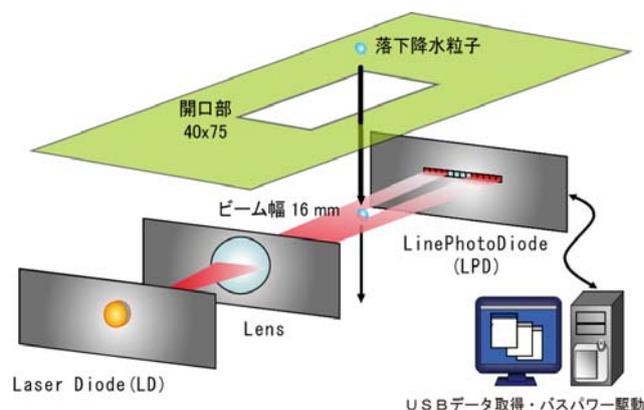


図2 計測原理

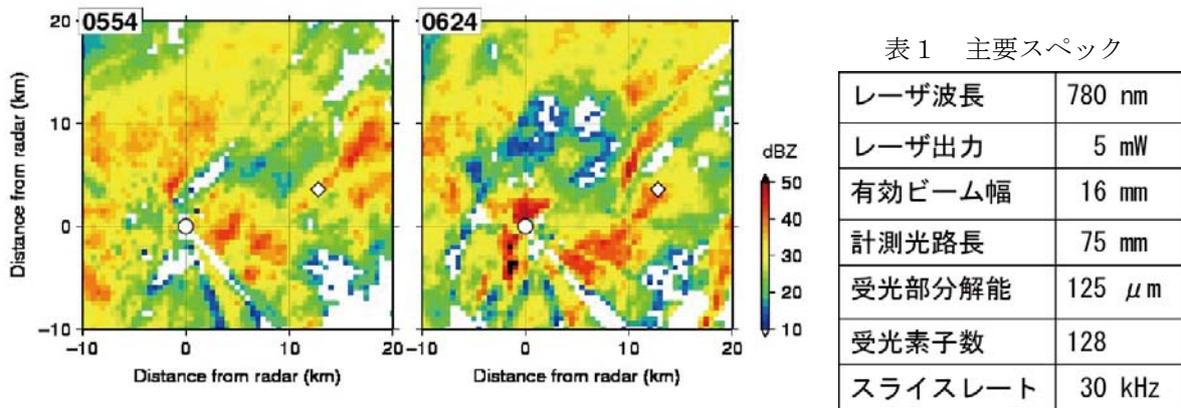


図3 名大 X-POL Z分布(PPI 仰角 1deg ; 2011/09/20 0554, 0624 JST)
○名古屋大学, ◇愛知工業大学

2.2 検証実験

検証実験は、愛知工業大学（名大X-band POLの東13 km ; 図3◇印）で、PROBEと雨滴粒径分布計(RD69 disdrometer)の同期観測を行っている。RD69は古典的な雨滴衝突の運動量検出型 disdrometerであり40年以上の実績がある。2011年9月20日の名大X-POLのエコー分布(0554, 0624 JST)を図3に示す。この時間のPROBEを通過した対流性降水セルを検証に用いる。

3 結果

2011/09/20 0626 JSTの1分間に計測した雨滴画像を図4に示す。落下雨滴は7~10スライス数で画像を取得し（図5参照）、PROBE筐体からの落下水滴は落下速度が遅く縦長画像になる。図中のノイズマークはデータ通信エラーにより画像にズレが生じている。

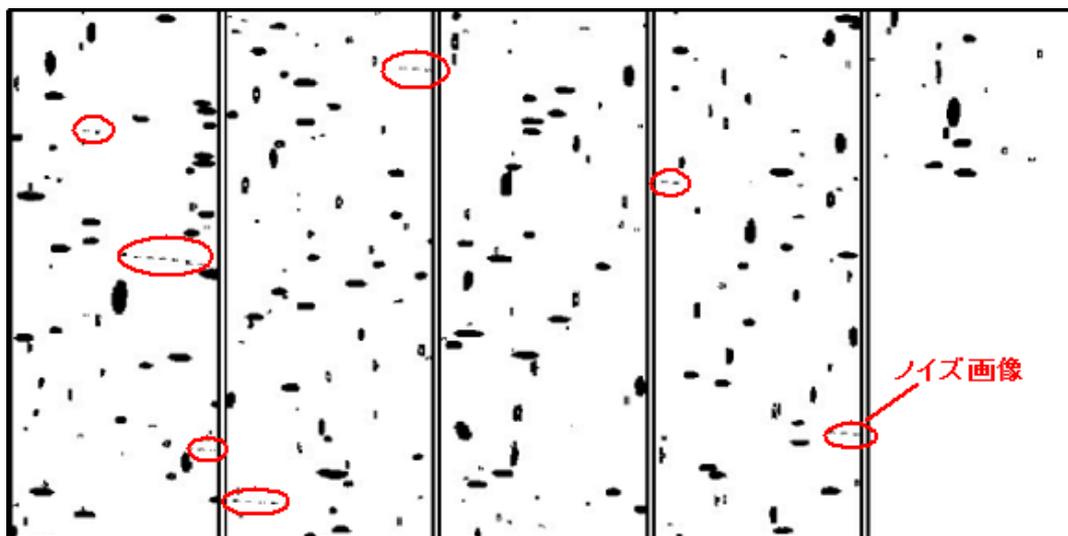


図4 PROBE 計測画像の例（2011/09/20 06:26 の1分間）
円（赤）で囲まれた画像は通信エラーによるノイズ画像

図5は、2011/09/20 0600 JSTからの1時間に検出した雨滴直径とスライス数の頻度分布を示す。図中の実線と破線はスライスレート30 kHzでの取得スライス数の理論値（期待値）を示し、理論計算での雨滴落下速度は実測データベース^[19]を用いた。また、雨滴は空気抵抗により扁平するため^[20]、楕円体近似で垂直落下と45°落下の理論値を示す。測定値は理論線の近くに現れ、PROBEの性能が確認できる。また、同図は落下雨滴とプローブ筐体からの二次水滴の分離条件を示している（図中の青枠）。(1)スライス数が10以上の青枠範囲は落下速度の遅い二次水滴を、(2)スライス数が4以下の範囲ではノイズ画像（図4参照）をカウントしているため、落下雨滴は(1),(2)の条件を排除することで抽出することができる。但し、雨滴径0.5 mm以下は落下雨滴、二次水滴、ノイズの分離が困難であり注意が必要である。

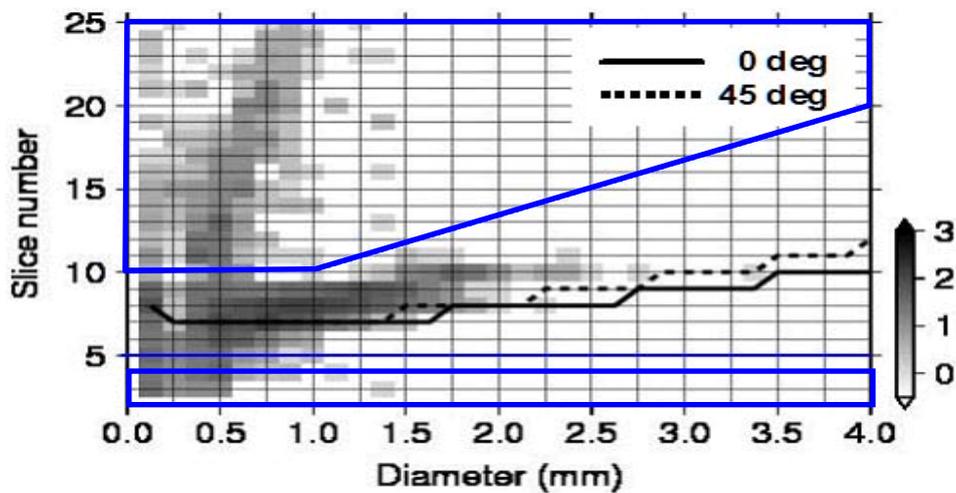


図5 雨滴直径とスライス数の関係（30 kHz）。グレイは雨滴検出総数（1時間積算の log scale 表示）。実線は垂直落下する楕円体雨滴のスライス数の理論値。破線は落下角度 45° の場合。青枠は落下雨滴抽出フィルタのマスク部分。

2011/09/20 05~07 JSTのPROBEとRD69の1分間カウント総数の時系列を図6に示す。PROBEのセンシングエリアは11 cm²（ビーム幅1.6 cm × 光路長 7.5 cm）、RD69は50 cm²であり、PROBEの検出総数は1/4でRD69相当となるが実際は1/5~1/10で変動している。図7は、2011/09/20 0550, 0620 JSTからの10分間積算DSDの比較であり、落下雨滴抽出フィルタ適用後のDSDを示す。PROBE数濃度はRD69に比べ半分程度であるが、DSDの形は良く似ている。PROBEは雨滴径レンジ0.5 mm以下で検出数が多いが、この原因は、ノイズ画像、二次水滴のカウントが考えられる。

図8は、PROBEとRD69の計測DSDから算出したレーダ反射因子と名大X-POLの仰角1degの観測値の時系列を示す。PROBEはRD69に比べ数dB~10 dB程度小さな値を示すが傾向はRD69とよく似ている。X-POLの偏波パラメータ(Zdrなど)との比較検証は今後の課題である。

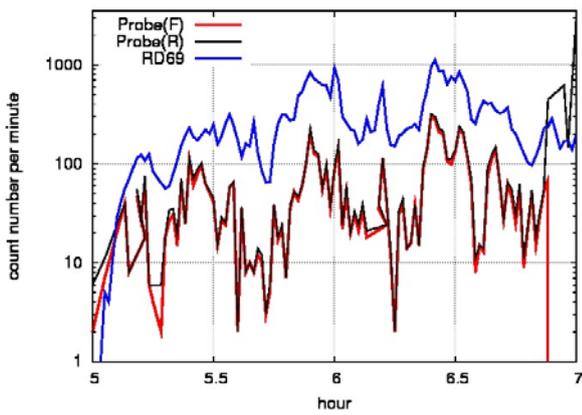


図6 PROBEとRD69の1分間カウント数の時系列(2011/09/20 05-07 JST)。Probe(R)はプローブの検出総数。Probe(F)は落下雨滴フィルタ後。

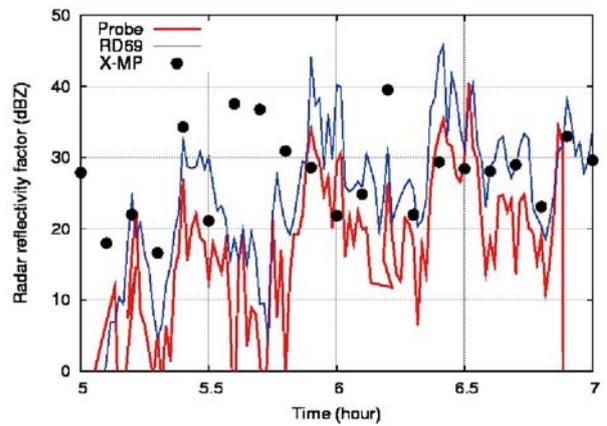


図8 レーダ反射因子の時系列(2011/09/20 05-07 JST)。PROBE (赤)、RD69 (青)、X-MP (●)。

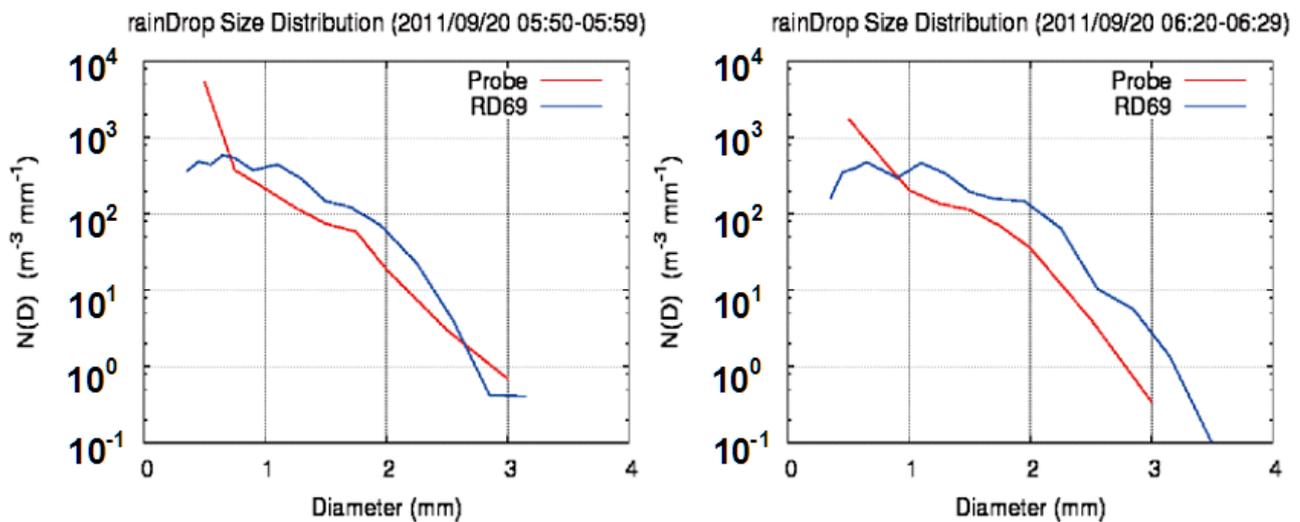


図7 PROBEとRD69の10分間積算DSDの比較(2011/09/20 0550, 0620 JST)

4 まとめ

RD69 disdrometerと同期観測を行い、PROBEの初期性能評価を行った。低コストで簡素なシステム構成ではあるが、地上観測機器として、雨滴直径・形状を得るに十分なスライス数(7~10スライス)で雨滴画像の取得ができた。DSD計測能力は、RD69に比べカウント数は少ないが、PROBEはRD69とよく似た形のDSDが計測できた。但し、PROBEとRD69にはサンプリングエリアの面積差があり、PROBEは大きな降水粒子の検出数に弱点があるのは自明である。現在は有意なDSD計測ができる条件(ビーム幅、光路長、降水粒子分布条件)を検討するステージにあり、有効サンプリング面積の拡幅とDSD計測評価は今後の大きな課題である。本文では示していないが、PROBEは1分間DSDでもRD69と良い一致を示す時間帯もあり、気球観測での上昇速度 5 m/sを考慮すると、高度300m毎にDSDを算出できる可能性も見えた。但し、気球観測では、上昇プラットフォームと下

降粒子の間で相対速度は速く、落下速度は上空の空気密度では速くなるため、気球観測用では、より高いスライスレートが必要である。また、絶対鉛直分解能を確保するために、カメラ撮影、または、2ビーム化による通過速度計測機能の付加、融解粒子の判別のためにグレイスケール化を行いたい。また、粒子検出数に与えるハウジング形状や設置方法の検討も必要である。

1 謝辞

本研究は、科研費 基盤(C) 小型降水粒子観測プローブの開発(22540448)の助成を受けている。

参考文献

- [1] Bringi, N., and V. Chandrasekar, 2001: Polarimetric Doppler Weather Radar: Principals and Applications, *Cambridge University Press*, 636 pp.
- [2] Campos, E., and I. Zawadzki, 2000: Instrumental uncertainties in Z-R relations, *J. Appl. Meteor.*, **39**, 1088-1102.
- [3] Joss, J., and A. Waldvogel, 1969: Raindrop size distribution and sampling size errors, *J. Atmos. Sci.*, **26**, 566-569.
- [4] Kruger, A., and W. F. Krajewski, 2002: Two-dimensional video disdrometer: A description, *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, **19**, 602-617.
- [5] Löffler-Mang, M., and J. Joss, 2000: An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors, *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, **17**, 130-139.
- [6] Makihara, Y., N. Kitabatake, and M. Obayashi, 1995: Recent development in algorithms for the JMA nowcasting system. Part 1: Radar echo composite and radar-amedas precipitation analysis, *Geophysical Magazine Series 2*, **1**, 171-204.
- [7] Minda, H., and K. Nakamura, 2005: High temporal resolution path-average rain gauge with 50-GHz band microwave, *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, **22**, 165-179.
- [8] Gossard, E. E., 1988: Measuring drop-size distributions in clouds with a clear-air-sensing Doppler radar, *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, **5**, 640-649.
- [9] Löffler-Mang, M., and M. Kunz, 1999: On the performance of a low-cost K-band Doppler radar for quantitative rain measurements, *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, **16**, 379-387.
- [10] Williams, C. R., W. L. Ecklund, and P. E. Johnston, 2000: Cluster analysis techniques to separate air motion and hydrometeors in vertical incident profiler observations, *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, **17**, 949-962.
- [11] Rose, C. R., and V. Chandrasekar, 2006: A GPM dual-frequency retrieval algorithm: DSD profile-optimization method, *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, **23**, 1372-1383.
- [12] Zhang, G., J. Vivekanandan, and E. Brandes, 2001: A method for estimating rain rate and drop size distribution from polarimetric radar measurements, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **39**, 830-840.
- [13] Ryzhkov, A. V., and D. S. Zrnić, 1998: Discrimination between rain and snow with a polarimetric

- radar, *J. Appl. Meteor.*, **37**, 1228-1240.
- [14] Anagnostou, M. N., E. N. Anagnostou, and J. Vivekanandan, 2006: Correction for rain path specific and differential attenuation of X-band dual-polarization observations, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **44**, 2470-2480.
- [15] Lawson, R. P., D. O'Connor, P. Zmarzly, K. Weaver, B. Baker, and Q. Mo, 2006: The 2D-S (stereo) probe: design and preliminary tests of a new airborne, high-speed, high-resolution particle imaging probe, *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, **23**, 1462-1477.
- [16] Takahashi, T., 1990: Near absence of lightning in torrential rainfall producing micronesia thunderstorms, *Geophys. Res. Lettr.*, **17**, 2381-2384.
- [17] Orikasa, N., and M. Murakami, 1997: A new version of hydrometeor videoprobe for cirrus cloud observations, *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 1033-1039.
- [18] 中北英一, 山口弘誠, 隅田康彦, 竹畑榮伸, 鈴木賢士, 中川勝広, 大石哲, 出世ゆかり, 坪木和久, 2008: 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, **51**, 519-533.
- [19] Gunn, R., and G. D. Kinzer, 1949: The terminal velocity of fall for water drops in stagnant air, *Journal of Meteorology*, **6**, 243-248.
- [20] Pruppacher, H. and K. V. Beard, 1970: A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **96**, 247-256.