降雨環境下におけるスパースアレイレーダの2Dイメージング

新事業創生・研究開発部門 Fujikura Technology Europe 川 口 拓 也¹・篠 塚 一 輝¹
Stefan Malterer²

2D Imaging of Sparse Array Radar in Rainy Scenes

T. Kawaguchi, K. Shinotsuka, and S. Malterer

近年、ミリ波レーダイメージングの需要が高まっていることを背景に、ミリ波レーダに対する高角度分解能化への期待が高くなっている。ミリ波レーダシステムの複雑化を抑制しつつ、高分解能化を実現する方法の一つとして、スパースアレイレーダがある。ここで、スパースアレイレーダの性能検証に降雨条件は一般に考慮されておらず、降雨がセンシング結果に与える影響については不明であった。そこで当社は、独自のスパースアレイレーダを構築し、自然の降雨が再現できる屋内試験場にて実施した測定結果を基に、降雨がスパースアレイレーダに与える影響について実験的検証を実施した。

In recent years, the demand for a millimeter-wave radar imaging has increased, therefore, a millimeter-wave radar with higher angular resolution has been highly expected. One of the solutions to achieve the higher angular resolution without increasing the complexity of the radar system is a sparse array radar. Generally, rain conditions are not considered in the verification of the sparse array radar performance, hence, an impact of the rain on the sparse array radar has not been clarified. For this reason we designed and fabricated an in-house developed sparse array radar, and experimentally verified the influence of the rain on the sparse array radar with several tests in a rain chamber.

1. まえがき

先進運転支援システム (ADAS) は、運転者と交通参加 者(他の車両,乗客,歩行者など)の安全を確保するため に使用される. ADASの最終的な開発目標は、運転者によ る制御と監視から完全に自律した車両を実現することであ る. ADASが機能するためには、自動運転制御システムへ 情報を提供するためのセンサが必要となる. ADASに使用 される一般的なセンサとしては,超音波センサ,ミリ波レー ダ、LiDAR、カメラがあげられる¹⁾. 一般に、超音波セン サとミリ波レーダは距離と速度を測るために使用され. LiDARとカメラはイメージング用途で使用される. ここ で、LiDARやカメラのような光学系のセンサは、雨や霧 といった悪天候下においてセンシング性能の低下が知られ ている2),3).一方で、ミリ波レーダは悪天候に対して堅牢 なセンサであることから、悪天候下でのイメージングを可 能とするために、ミリ波レーダをイメージング用途に使用 する検討が近年盛んである4)-6). しかし, 従来のミリ波レー ダをイメージング用途として使用するためには角度分解能 が低いという問題を有している. ミリ波レーダの角度分解

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{D\cos\theta}$$
 (1)

ここで、 λ は波長、Dはアレイ開口、 θ はレーダボアサ イトからの角度を示す. 式1より, 角度分解能を向上させ るためにはアレイ開口を大きくする必要があることがわか る. 基本的なアレイ構成として知られる均一線形アレイ (ULA) を例として考えると、アレイ開口の拡大は物理ア ンテナ素子数の増加を伴うことがわかる (図1a₁, a₂). 物 理アンテナ数増加を抑制する方法の一つに、Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) 技術がある. MIMO技術 とは複数の送信アンテナから電波を送信し、複数の受信ア ンテナで電波受信する技術であり、MIMOレーダとするこ とで、物理アンテナ数の増加を抑制しつつアレイ開口を大 きくすることが可能である⁸. しかし, ミリ波レーダイメー ジングシステムは従来のミリ波レーダシステムよりも高い 角度分解能を求められるため、MIMO技術だけではアンテ ナ数の抑制は十分とは言えない、例えば、水平および仰角 方向に1°の角度分解能を有するミリ波レーダイメージング システムをMIMO-ULAによって構築する場合、200個を超 える物理アンテナが必要となる. このようなアンテナ数の

能は、式1のように定義される⁷⁾.

¹ 戦略センター 情報処理応用技術グループ

² Optical and RF Technologies R&D Department

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
ADAS	Advanced Driver-Assistance Systems	先進運転支援システム. 安全でより良い運転のために車両システムを自動化・適応・強化するために開発されたシステム
ULA	Uniform Linear Array	半波長かつ等間隔に直線上にアンテナ素子が配置されたア ンテナアレイ
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	複数の送信アンテナと複数の受信アンテナを用いて電波の 送受信を行う技術
FOV	Field Of View	視野角
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave	ある周波数の連続波を一定時間にわたって周波数変調しながら送信する方式
RCS	Radar Cross Section	レーダ断面積
IF	Intermediate Frequency	中間周波数
DOA	Direction of Arrival	到来角
レンジビン	Range Bin	距離方向の目盛り、最小単位
レーダボアサイト	Radar Boresight	2Dアンテナアレイが形成する面に対して垂直な方向
アンダーサンプリング	Undersampling	サンプリング周波数が信号に含まれる最大周波数の2倍を 下回っている状態
エイリアシング	Aliasing	折り返し雑音、偽信号
グレーティングローブ	Grating Lobe	メインローブ同様の大きさを持つサイドローブ

増加は、ハードウェア構成の複雑化、信号処理負荷増大、 システムコスト増加につながる.

アレイ開口拡大に伴うアンテナ数増加抑制方法の一つと して、スパースアレイアンテナがあげられる、スパースア レイアンテナとは、アンテナ素子が間引かれたアンテナア レイである. ULAは、アンテナ素子がλ/2間隔で等間隔 に配置される(図1a₂)が、これに対してスパースアレイ アンテナは、アンテナ配置間隔がλ/2よりも大きく、アン テナ素子は等間隔または不等間隔に配置される(図1b₁, b₂). これにより、同じアレイ開口を有するULAよりも少 ない物理アンテナ数でアレイを構築することが可能となる ことから、スパースアレイアンテナはミリ波レーダを高角 度分解能化する手法として注目されている $^{10)-12)}$. 一方で. ULAよりも少ないアンテナ素子数でアレイを構成するこ とは、視野(FOV)に対してアンダーサンプリング状態 となることを意味し、これによりスパースアレイアンテナ はグレーティングローブのようなエイリアシングを生じて しまう可能性がある. エイリアシングはシステムのS/N比

を劣化させ、結果的には出力イメージの劣化につながる. これに対しては様々な検討が実施されており、例えば適切 にアレイ設計を実施することによりエイリアシングを抑制 することができると報告されている¹⁰⁾. しかし, エイリア シング発生に関する検討に降雨による影響を考慮した例は 確認できていない. ミリ波レーダによるセンシングでは, 受信信号の位相情報が非常に重要となるが、信号の位相は 降雨によって影響を受ける. 自動車用長距離ミリ波レーダ に使用されている周波数帯である76-81 GHz 12) の場合、電 波の波長は3.7 mm - 3.9 mmであるが, これは平均的な雨 粒のサイズに近いため、電波が降雨条件下で伝搬する際に は、雨粒による電波の散乱が発生する可能性がある。この 散乱は、伝搬電波の位相および振幅にランダムな変化を発 生させるため¹³⁾、ミリ波レーダセンシング結果に影響を与 えることが考えられる. ここで、スパースアレイアンテナ はアンダーサンプリング状態であることから、位相変化の 影響が大きくなり、エイリアシングが変化してS/N比が劣 化する等の影響を受ける可能性がある. 以上から本報告で

は、独自のスパースアレイレーダを構築し、自然の降雨が 再現できる屋内試験場にて実施した測定結果を基に、降雨 がスパースアレイレーダに与える影響について実験的検証 を実施した結果について報告する.

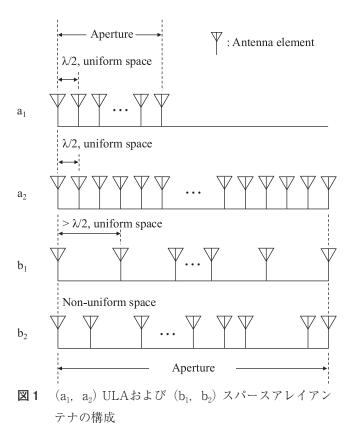


Fig. 1. (a₁, a₂) Antenna configurations of ULA, and (b₁, b₂) antenna configurations of sparse array.

2. 実験

2. 1 降雨試験設備

自然の降雨が再現できる屋内試験場として,国立研究開発法人防災科学技術研究所が所有する大型降雨実験施設を利用した.この施設は、自然降雨に近い状態を再現できる世界最大級の規模・能力を有する散水施設である¹⁴⁾.この施設は、長さ76 m、幅49 mおよび高さ21 mの大きさであり、地面はアスファルト舗装が施されていた.

本施設を利用したスパースアレイレーダへの降雨の影響検証を実施する前に、本施設が自然降雨に近い状態を再現できるか実験的に検証した。自然降雨の雨滴の粒径分布については、MarshallとPalmerによって、式2の実験式が観測結果に基づいて導かれている¹⁵⁾.

$$N_D = N_0 \cdot \exp(-\kappa \cdot D) \quad (2)$$

ここで、 N_D は雨滴の数、Dは雨滴の直径を表している。

 N_0 はD=0となるときの N_D であり、 0.08 cm^4 である。 κ は 41R^{-0.21}と表され、Rはmm hr⁻¹を単位とする降雨量である. 本施設における雨滴の粒径分布が式2に類似した傾向を示 した場合、本施設は自然降雨に近い状態を再現できている と言える. 本施設で降雨量50 mm hr⁻¹の降雨を再現し, COTT-Parsivel-2によって測定した雨滴の粒径分布と、式 2においてR=50としたときのMarshall-Palmer分布を図2に 示す. 図2より、実測結果とMarshall-Palmer分布がよい一 致を示す結果が得られた。この結果から、本施設は自然降 雨に近い粒径分布を再現できていることが確認された. 一 方で、50 mm hr⁻¹という非常に激しい雨を考えると、自然 降雨では砂や埃などが雨の中に混ざることが容易に想像で き、これらの粒子がミリ波レーダセンシングに影響する可 能性が考えられる. 本報告ではこれらの要素を考慮せず, 雨滴の粒径、量および分布を考慮した検証結果について報 告する.

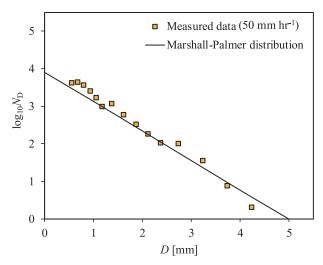


図2 50 mm hr⁻¹における雨滴の粒径分布の測定結果と Marshall-Palmer分布

Fig. 2. Measurement results of the raindrop size distribution at 50 mm hr⁻¹ rain (orange squares), and the Marshall-Palmer distribution for R=50 (black solid line).

2. 2 スパースアレイレーダ

検証に用いたスパースアレイレーダの外観を図3に示す. 本スパースアレイレーダは、4つのミリ波レーダIC (AWR2243, Texas Instruments)をカスケード接続しており、それぞれのICが3つの送信アンテナと4つの受信アンテナを備えることが可能であるため、合計で12個の送信アンテナと16個の受信アンテナを備えたシステムである. これらのアンテナをすべて用いてMIMOを実施することで、192個の仮想アンテナを生成することが可能となる. AWR2243はFMCW信号を生成することが可能であり、本スパースアレイレーダはFMCWレーダとして機能する。アンテナ間隔は1.5 λ で設計されており、図4に示したような2Dアレイ構成を有している。同じアレイ開口を有するULAと比較した場合、本スパースアレイレーダは86個少ないアンテナ素子で同じ角度分解能を実現することが可能となる。本スパースアレイレーダの仕様を表1に示す。初期特性評価の結果から、距離方向の絶対誤差は±4 cm未満であり、方位角の絶対誤差は±0.5°未満であることが確認された。

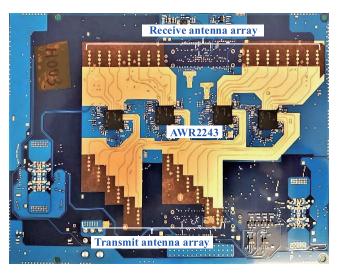


図3 検証に用いたスパースアレイレーダの外観

Fig. 3. Appearance of the in-house developed sparse array radar.

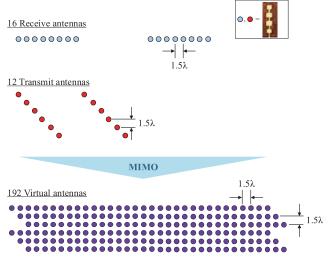


図4 スパースアレイレーダのアレイ構成

Fig. 4. Array configuration of the in-house developed sparse array radar.

表1 スパースアレイレーダ仕様

Table 1. Specification of the sparse array radar.

Parameter	Value	
Center frequency	78.44 GHz	
Bandwidth	1926 MHz	
Max. detectable range	35 m	
Max. detectable angle	$\pm 20^{\circ}$ in azimuth	
	±13° in elevation	
Range resolution	0.16 m	
Angular resolution	1.2° in azimuth	
	7.5° in elevation	
Absolute error	± 0.04 m in range	
	$\pm 0.5^{\circ}$ in azimuth	

2. 3 測定条件

スパースアレイレーダへ降雨が与える影響を検証するために、2つの測定を実施した。1つ目は、降雨がスパースアレイレーダの距離検知性能に与える影響を検証するための測定であり、図5aのような条件で実施した。ターゲットとして、直径0.1 m、長さ0.3 m、RCS 18.7 dBsmのアルミパイプを使用し、レーダ正面10 mの位置に設置した。レーダはテント内に設置し、レーダに直接雨が当たらない状態で測定を実施した。2つ目の測定は、角度検知に与える影響を検証するための測定であり、図5bのような条件で実施した。2つのターゲットをレーダ正面10 mの距離に、レーダと2つのターゲットが成す角が3°となるように設置した。それぞれの測定は、降雨量0 mm hr¹と50 mm hr¹の2つの条件で実施し、結果を比較することで降雨がスパースアレイレーダに与える影響を検証した。

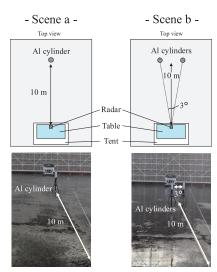


図5 (a) 距離検知および (b) 角度検知への影響検証の ための測定条件

Fig. 5. Measurement setup for verification of the impact on (a) range detection and (b) angle detection.

3. 結果

3. 1 距離検知への影響

図5aの測定から得られた距離プロファイルを図6に示す. 距離プロファイルは、レーダによって取得したIF信号に 対してRange Doppler FFTを実施した後、各仮想アンテ ナのzero-Dopplerとなる距離プロファイルをインコヒーレ ント積分することで取得した. また, 測定時のバックグラ ウンドからの反射の影響を確認するため、降雨量0 mm hr⁻¹でターゲットを設置せずに測定した場合の距離プロ ファイルについても図6に示した. 図6より, 距離プロファ イルにおいて、10.12 mにターゲット由来と推定されるピー クが確認された. 0 mm hr⁻¹と50 mm hr⁻¹の距離プロファ イルを比較すると, 50 mm hr⁻¹のピークの方が1.1 dB小さ くなる結果が示された. これは, 降雨環境下をミリ波信号 が伝搬した際の降雨由来の減衰によるものと考えられる. 一方で、ピークトップの検出位置については0 mm hr¹と 50 mm hr⁻¹の場合で変化が確認されず、繰り返し測定を 行った場合でもピークトップ位置の変化は確認されなかっ た (表2).

図5aの測定から得られた2Dイメージング結果(ヒートマップ)を図7に示す。イメージング結果は、Range Doppler FFT後の結果に対して、FFTベースのDOA推定を実施することで取得した。強度については、0 mm hr⁻¹のイメージング結果の最大値によって正規化した。2つのイメージング結果を比較すると、降雨量が50 mm hr⁻¹異なるにも関わらず、イメージング結果から明確な性能劣化は

確認されなかった. ターゲットの距離方向の検出位置についても、両者の間に明確な差は確認されず、これは降雨による距離検知への影響がシステム誤差 ±4 cm未満であることを示唆している. 以上より、距離プロファイルおよび2Dイメージング結果の両方に降雨による距離検知への有意な差が確認されなかったことから、スパースアレイレーダは距離検知に対して降雨による強い影響を受けないことが示唆された.

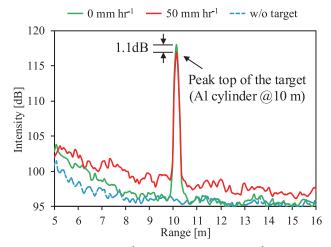


図6 降雨量0 mm hr⁻¹ (緑実線) と50mm hr⁻¹ (赤実線) およびターゲットがない場合 (水色破線) の距離プロファイル

Fig. 6. Range profile of the measurements at (green solid line) 0 mm hr⁻¹, (red solid line) 50 mm hr⁻¹ and (blue dashed line) without target.

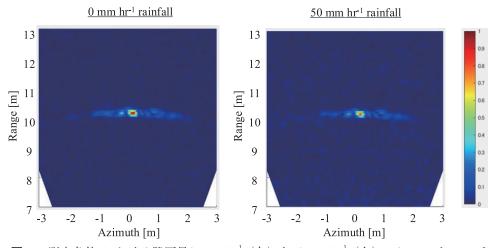


図7 測定条件aにおける降雨量0 mm hr^{-1} (左) と50mm hr^{-1} (右) の2Dヒートマップ Fig. 7. 2D heatmap of the measurements for the scene a in (left) 0 mm hr^{-1} and (right) 50 mm hr^{-1} .

表2 繰り返し測定時のピーク位置検出結果 Table 2. Peak-top of several measurements.

Rate of rain [mm hr ⁻¹]	Iteration	Peak-top [m]
0	1	10.12
	2	10.12
	3	10.12
50	1	10.12
	2	10.12
	3	10.12

3.2 角度検知への影響

図5bの測定から得られた水平プロファイルを図8に示す.水平プロファイルは、ターゲット設置位置である10 mに最も近いレンジビンのデータをDOA推定の結果から抜き出したものである. 距離プロファイルを作成した際と同様に、測定時のバックグラウンドからの反射の影響を確認するため、降雨量0 mm hr¹でターゲットを設置せずに測定した場合の水平プロファイルについても図8に示した. 図8より、水平プロファイルについても図8に示した. 図8より、水平プロファイルにピーク間隔が3.43°となる2つのピークが確認されたことから、これらのピークはターゲット由来のピークであると推定される. 0 mm hr¹と50 mm hr¹の結果を比較すると、50 mm hr¹のピークが小さくなる結果が示されており、これは距離プロファイルで確認された減衰と同様の理由で生じた減衰であると考えられる.また、図5bの測定についても繰り返し測定を実施した結果、ピークトップ検出間隔については0 mm hr¹と50 mm

hr⁻¹の場合で変化が確認されなかった(表3). 図5bの測定 から得られた2Dイメージング結果(ヒートマップ)を図9 に示す. イメージング結果は, 距離検知への影響検証の場合と同じ方法で作成した. 2つのイメージング結果を比較すると, 降雨量50 mm hr⁻¹の結果に明確な性能劣化は確認されなかった. ターゲットの水平方向の検出位置についても, 両者の間に明確な差は確認されず, これは降雨による角度検知への影響がシステム誤差±0.5°未満であることを示唆している. 以上より, 水平プロファイルおよび2Dイメージング結果の両方に降雨による角度検知への有意な差が確認されなかったことから, スパースアレイレーダは角度検知に対して降雨による強い影響を受けないことが示唆された.

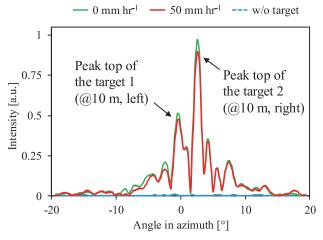


図8 降雨量0 mm hr⁻¹ (緑実線) と50mm hr⁻¹ (赤実線) およびターゲットがない場合 (水色破線) の水平プロファイル Fig. 8. Azimuth profile of the measurements at (green solid line) 0 mm hr⁻¹, (red solid line) 50 mm hr⁻¹ and (blue dashed line) without target.

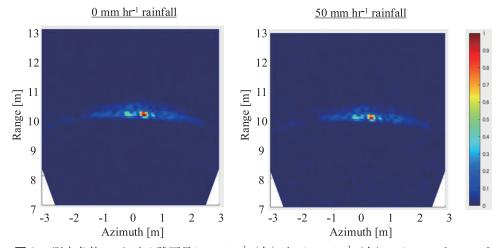


図9 測定条件bにおける降雨量 0 mm hr^{-1} (左) と 50mm hr^{-1} (右) の2 Dヒートマップ

Fig. 9. 2D heatmap of the measurements for the scene b in (left) 0 mm hr⁻¹ and (right) 50 mm hr⁻¹.

表3 繰り返し測定時のピークトップ間隔検出結果

Table 3. Angles between the peak-tops of several measurements.

Rate of rain [mm hr ⁻¹]	Iteration	Angle b/w peak-tops [°]
0	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
50	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43

4. むすび

本報告では、降雨がスパースアレイレーダのセンシング結果に与える影響を実験的に検証した、測定は、独自設計したスパースアレイレーダを用い、自然降雨の雨滴の粒径分布を再現可能な降雨施設で実施した、検証の結果、降雨量50 mm hr¹の強い雨の中であってもスパースアレイレーダの距離検知および角度検知の劣化兆候は確認されなかった。この検証結果から、スパースアレイレーダは屋外環境で使用可能な高角度分解能ミリ波レーダイメージングシステムの実現に貢献できることが示唆された。

参考文献

- C. Waldschmidt, J. Hasch, and W. Menzel, "Automotive radar — from first efforts to future systems," IEEE Journal of Microwaves, vol. 1, no. 1, pp. 135–148, 2021.
- M. Byeon and S. W. Yoon, "Analysis of Automotive Lidar Sensor Model Considering Scattering Effects in Regional Rain Environments," in IEEE Access, vol. 8, pp. 102669-102679, 2020.
- 3) T. Brophy et al., "A Review of the Impact of Rain on Camera-Based Perception in Automated Driving Systems," in IEEE Access, vol. 11, pp. 67040-67057, 2023
- 4) A. Meta, P. Hoogeboom and L. P. Ligthart, "Signal Processing for FMCW SAR," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 45, no. 11, pp. 3519-3532, Nov. 2007.
- 5) R. Z. Syeda, T. G. Savelyev, M. C. van Beurden and A. B. Smolders, "Sparse MIMO Array for Improved 3D mm-Wave Imaging Radar," 2020 17th European Radar

- Conference (EuRAD) , Utrecht, Netherlands, 2021, pp. 342-345.
- 6) G. Schnoering, T. Kawaguchi and C. Höller, "Mixed Near-and Far-Field 2D Imaging with Sparse Arrays," 2024 IEEE Radar Conference (RadarConf24), Denver, CO, USA, 2024.
- 7) X. Li, X. Wang, Q. Yang, and S. Fu, "Signal processing for TDM MIMO FMCW millimeter-wave radar sensors," IEEE Access, vol. 9, pp. 167 959–167 971, 2021.
- 8) I. Bilik, O. Longman, S. Villeval and J. Tabrikian, "The Rise of Radar for Autonomous Vehicles: Signal Processing Solutions and Future Research Directions," in IEEE Signal Processing Magazine, vol. 36, no. 5, pp. 20-31, Sept. 2019.
- D. Mateos-Núñez, M. A. González-Huici, R. Simoni, F. B. Khalid, M. Eschbaumer and A. Roger, "Sparse array design for Automotive MIMO Radar," 2019 16th European Radar Conference (EuRAD), Paris, France, 2019, pp. 249-252.
- 10) S. Sun and A. P. Petropulu, "A Sparse Linear Array Approach in Automotive Radars Using Matrix Completion," ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Barcelona, Spain, 2020, pp. 8614-8618.

- 11) C. Schuessler, M. Hoffmann and M. Vossiek, "Super-Resolution Radar Imaging With Sparse Arrays Using a Deep Neural Network Trained With Enhanced Virtual Data," in IEEE Journal of Microwaves, vol. 3, no. 3, pp. 980-993, July 2023.
- 12) C. Waldschmidt, J. Hasch and W. Menzel, "Automotive Radar — From First Efforts to Future Systems," in IEEE Journal of Microwaves, vol. 1, no. 1, pp. 135-148, Jan. 2021.
- 13) B. Yektakhah and K. Sarabandi, "Physics-Based Coherent Modeling of Long-Range Millimeter-Wave Propagation and Scattering in Rain," in IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, vol. 4, pp. 588-601, 2023.
- 14) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 水・土砂防 災研究部門, "大型降雨実験施設," https://www.bosai. go.jp/shisetsu/rain/kohushisetsu001.html, (2025/2/13 アクセス).
- 15) Marshall, J.S. and Palmer, W.M.K. "The Distribution of Raindrops with Size," Journal of Meteorology, 5, 165-166, 1948.