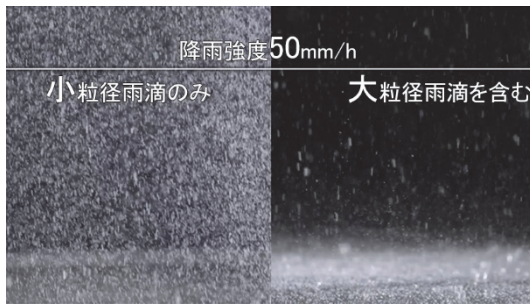


国際協創で実現する自律型モビリティ評価基盤の高度化

Advancing an Evaluation Platform for Autonomous Mobility through International Collaboration



中山 悠^{*1}
Haruka Nakayama

吉見 一真^{*2}
Kazuma Yoshimi

モロス ブラヤン^{*2}
Bryan Moross

清水 亮太^{*3}
Ryota Shimizu

日根野 義克^{*4}
Yoshikatsu Hineno

岡田 幸一郎^{*5}
Koichiro Okada

自律型モビリティの安全性評価では、悪天候を模擬した屋内試験と実環境との整合性確保が課題である。本研究では、英国の National Physical Laboratory 及び Met Office との協創の下、屋内降雨・霧模擬設備と屋外観測データを対応付ける手法を構築した。同等の降雨強度条件で屋内外データの雨滴粒径分布及び落下速度分布を比較した結果、降雨強度 10mm/h 以下では実環境と類似した特性が確認された一方、40mm/h を超える条件では差異が大きく、多面的な評価の重要性が明らかになった。これより、屋内試験と実環境との対応付けの留意点を整理し、屋内外データを活用した仮想試験の気象モデル構築や評価サービスに資する知見を得た。

1. はじめに

自動運転車を含む自律型モビリティの実用化に向けては、雨や霧などの悪天候を含む様々な環境条件下において安全性を確保するための評価技術の確立が重要である。これまで、屋外実環境試験は実態把握に有効である一方、気象条件の繰り返し再現性や網羅性に制約があり、評価の効率化に課題があった。一方で、屋内模擬試験は再現性の高い条件での試験が可能であるが、実環境との対応関係を明確にすることが困難であり、その結果の妥当性を検証する手法が十分に確立されていなかった。近年では、こうした課題に対して、屋内試験、実環境試験及び仮想試験(シミュレーション)を組み合わせた評価の枠組みの重要性が指摘されている^{(1), (2)}。

本報は、National Physical Laboratory(英国立物理学研究所、以下、NPL)及び Met Office(英国気象庁)との協創のもと、降雨・霧模擬が可能な屋内試験設備と NPL/Met Office が保有する屋外観測データを対応付けることにより、屋内模擬試験環境の妥当性を検証した結果を報告する。これより、屋内外データの対応関係を明らかにすることで、屋内試験設備を用いた悪天候下における自動運転安全性評価の信頼性向上を図る。

2. 評価基盤の構成と設計思想

NPL 及び Met Office は、悪天候条件における Connected and Automated Vehicle(CAV)用センサの性能を信頼性高く評価するため、センサ校正ラボ(Calibration lab)、屋外気象試験場(Real World Weather Testbed)、屋内気象模擬試験場(Physical Weather Simulator)、仮想試験環境(Virtual Testing Environment)を組み合わせた試験エコシステムの考え方を示している⁽²⁾。当該エコシステムを参照して整理した本報の評価基盤の構成を図 1 に示す。図中の灰色線は、各試験

*1 三菱重工機械システム株式会社 設備インフラ事業本部 SJプロジェクト室 主席部員 技術士(航空・宇宙部門)

*2 三菱重工機械システム株式会社 設備インフラ事業本部 新事業開発部

*3 三菱重工業株式会社 成長推進室 コーポレートベンチャリンググループ 主席部員

*4 三菱重工機械システム株式会社 設備インフラ事業本部 新事業開発部 次長

*5 Vice President, Dusseldorf Branch, Mitsubishi Heavy Industries EMEA, Ltd.

環境で取得したデータを用いたモデル構築及び相関付けを示す。仮想試験環境では、屋内外で取得した気象データ及びセンサ性能データから気象モデルやセンサ性能モデルを構築し、広範な気象条件に対する評価を行う。本報では、図1に示す屋外気象試験場と屋内気象模擬試験場で取得した気象データ(weather measurement)を対象とし、両者の対応付けを検証する。屋内気象模擬試験場では、再現性の高い条件でのデータ取得が可能であり、屋外気象試験場で取得される気象データは、ばらつきを含むリアルなデータ取得が可能である。両者の特性を統合的に活用、屋内試験条件を実環境に照らして対応付けることで、将来的に仮想試験環境で用いる気象モデル(Weather model)の構築に資するデータ基盤を整備する。

具体的には、両環境で取得した気象条件及び試験データを共通指標に基づいて整理し、屋内試験条件が屋外環境のどの条件に対応するかを明確化する。これにより、屋内試験結果の妥当性を担保できる範囲及び留意点を把握し、気象モデルに反映すべき気象条件を整理可能とする。さらに、条件のばらつきや屋内外データ差異も含めて整理することで、屋内試験環境における悪天候再現性及び安全性評価の信頼性向上に資する知見を得ることを目的とする。

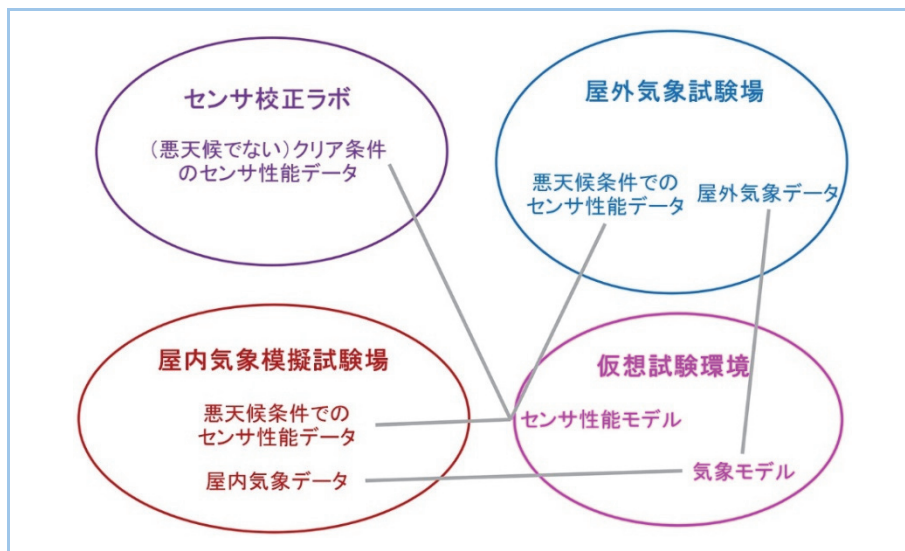


図1 自律型モビリティ用センサの性能試験エコシステム

悪天候条件におけるセンサ性能の評価基盤

灰色線は、試験環境間のデータ連携、モデル構築及び相関付けを示す。仮想試験環境は、実環境試験及び屋内模擬試験を補完するための気象モデル・センサ性能モデルを提供する。

3. 試験設備及び取得データ

屋内模擬環境には、三菱重工機械システム株式会社の降雨・霧模擬技術を適用したエンジニアリングモデル(以下、EM)を用いる。EMの概要を図2に示す。本設備では、降雨強度や霧の視程などの気象条件を制御可能であり、再現性の高い条件で気象データを取得できる特徴を有する。さらに、設備内部にはディストロメータを設置し、雨滴の粒径分布及び落下速度を計測している。ディストロメータの外観を図3に示す。参考文献(3)では、雨滴分布の異なる降雨環境を生成し、同じ降雨強度であってもセンサ性能に与える影響が異なることを実測及び、シミュレーションによって検証している。

一方、屋外環境データは、NPL 及び Met Office が運用する観測環境において取得されたものであり、降雨及び霧を含む自然条件下での気象データ及び試験データから構成される⁽⁴⁾。屋外観測においても、EM内に設置したものと同一型式のディストロメータを用いて雨滴の粒径分布及び落下速度を取得している。これにより、屋内外で同一の計測機器により取得した気象データに基づく比較が可能となる。

本報では、屋内外のデータを比較可能とするため、ディストロメータにより取得した雨滴粒径分

布及び落下速度分布を共通指標として比較した結果を報告する。

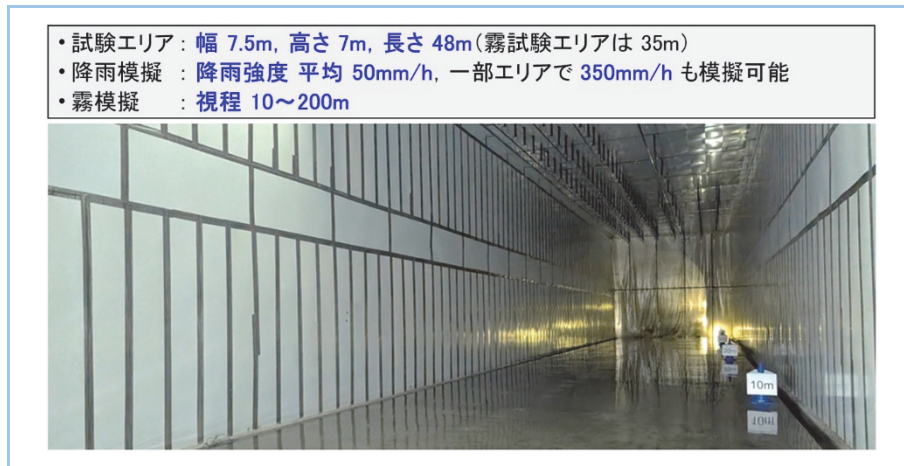


図2 エンジニアリングモデル

降雨・霧 模擬の技術検証やセンサの認知性能評価が可能

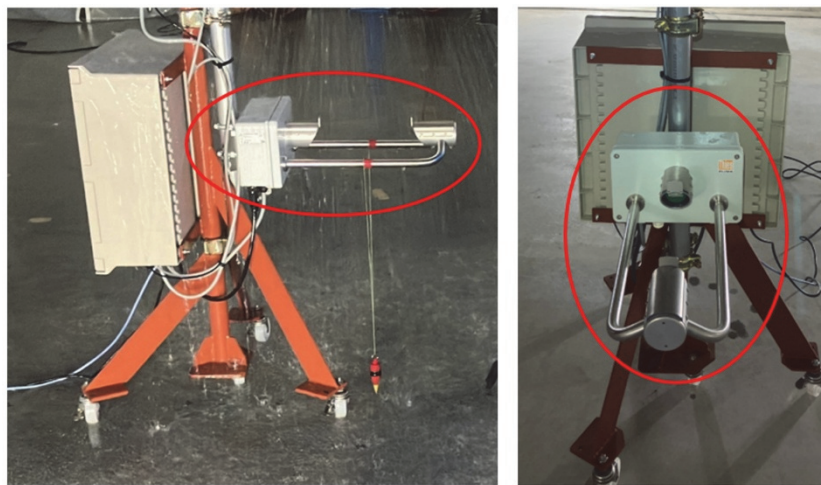


図3 ディスドロメータ

降雨強度, 粒径分布, 落下速度を計測

4. 対応付け手法及び検証結果

本章では、屋内模擬環境と屋外環境の対応付け手法の詳細について述べるとともに、その検証結果を示す。対応付けにあたっては、雨滴粒径分布及び雨滴落下速度分布に着目した。雨滴粒径分布には代表的な気象モデルである Marshall–Palmer (以下, MP) 分布⁽⁵⁾, 雨滴落下速度は Gunn–Kinzer (以下, GK) の実験値 (静止空气中を落下する水滴の粒径と終端速度の関係)⁽⁶⁾を参照として、屋外の観測データ及び EM で取得したデータを比較することにより、屋内模擬環境の屋外環境に対する対応関係を評価した。

4.1 屋外の降雨特性と参照分布・参照曲線の比較

屋外の降雨観測データについて、異なる降雨環境における降雨強度の経時変化を図 4 に示す。上段を降雨強度の時間変化が小さい Stable Rain (以下, SR), 下段を時間変化の大きい Variable Rain (以下, VR) としており, SR は降雨強度 2.6~4.5mm/h, 平均 3.45mm/h である。一方, VR は降雨強度が 1~138 mm/h と時間的に大きく変化するため, 説明の便宜上, 低降雨強度帯 (1~7mm/h), 中降雨強度帯 (30~74mm/h), 高降雨強度帯 (90~138mm/h) の 3 帯に分類している。

図 5 に SR と VR の雨滴粒径分布を示す。SR の雨滴粒径分布は MP 分布とほぼ重なり, 良好に一致した。これに対し, VR では降雨強度の増加に伴って MP 分布からの乖離が顕著となった。VR の低降雨強度帯では, 粒径分布が MP 分布と交差し, 粒径ごとの個数密度の変化が大きい傾

向を示した。中降雨強度帯では、粒径 1～3mm の範囲で MP 分布に近づく一方、その範囲外では個数密度が高くなる傾向を示した。さらに、高降雨強度帯では中降雨強度と類似した分布形状を示しつつ、全体として MP 分布を上回る傾向が確認された。なお、MP 分布との比較においては、同分布が降雨強度をパラメータとしており、降雨強度の増加に伴い、MP 分布は縦軸切片を一定に保ちながら傾きが緩やかになり、大粒径側の雨滴個数密度が相対的に増加する。

次に、屋外における雨滴粒径と落下速度の関係を図 6 に示す。図 6 では、GK 曲線を基準として屋外の観測データを比較した。SR は GK 曲線とほぼ一致し、時間変化の小さい低降雨強度では雨滴の落下挙動が理想的な終端速度に近いことを示している。一方、VR では降雨強度の時間変化によって異なる傾向が確認された。低降雨強度帯においては、1mm/h のデータは GK 曲線とほぼ一致し、7mm/h では雨滴径が 1mm 以上 4mm 以下の領域で GK 曲線をわずかに下回っている。中降雨強度帯では、落下速度の増加が早い段階で抑制され、GK 曲線を下回る推移を示した。また、大粒径領域では落下速度にばらつきが生じた。高降雨強度帯でも同様に、落下速度の抑制が早期に生じ、GK 曲線を下回るとともに、大粒径における速度の乱れが顕著となった。この要因としては、大粒径の雨滴数が数個～数十個程度と少ないため、個々の雨滴落下速度の計測誤差が平均値に与える影響が、小粒径の場合より大きいことが考えられる。

以上より、屋外の雨滴粒径分布と落下速度分布は、時間変化の小さい低降雨強度領域では MP 分布及び GK 曲線と良好に一致する一方、中～高降雨強度領域では粒径分布及び落下速度の両面において理論モデルから乖離する傾向を有することが分かる。これより、降雨強度という単一指標では自然界の降雨特性を十分に表現できず、粒径分布及び落下速度分布を含めた多面的な評価が必要であることが確認できた。

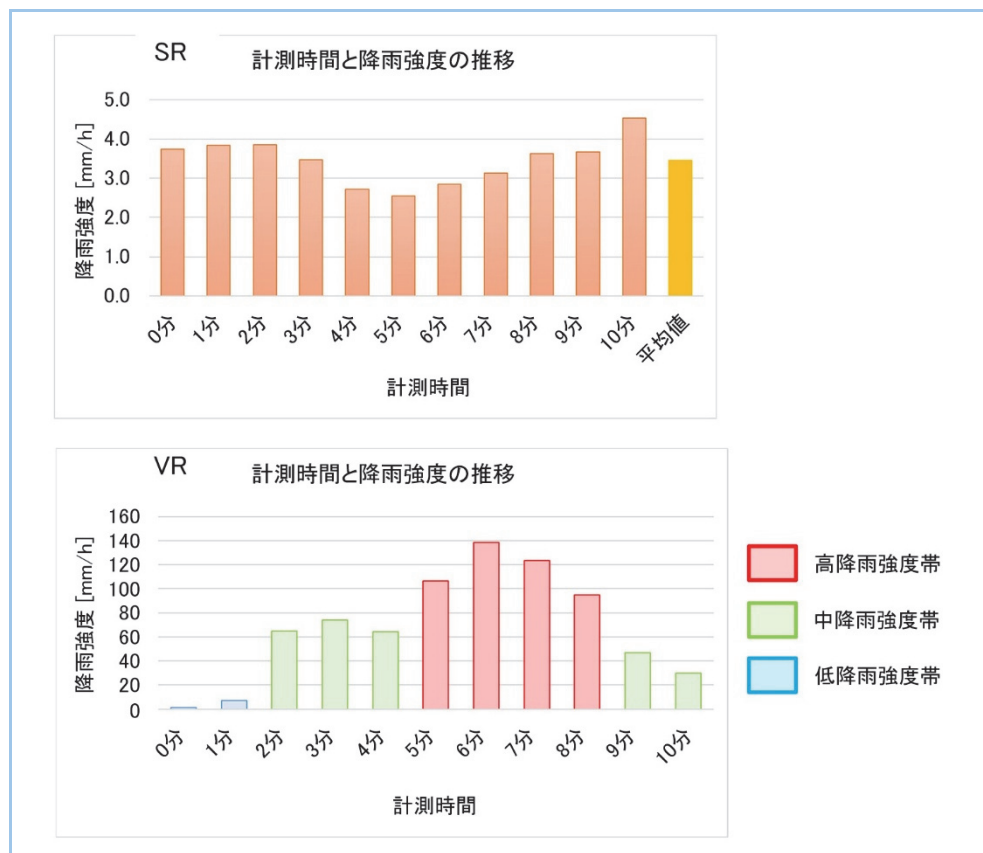


図4 屋外観測データの降雨強度の経時変化

上段: 時間変化の小さい低降雨強度の雨 (Stable Rain, SR)

下段: 降雨強度が時間的に大きく変化する雨 (Variable Rain, VR)

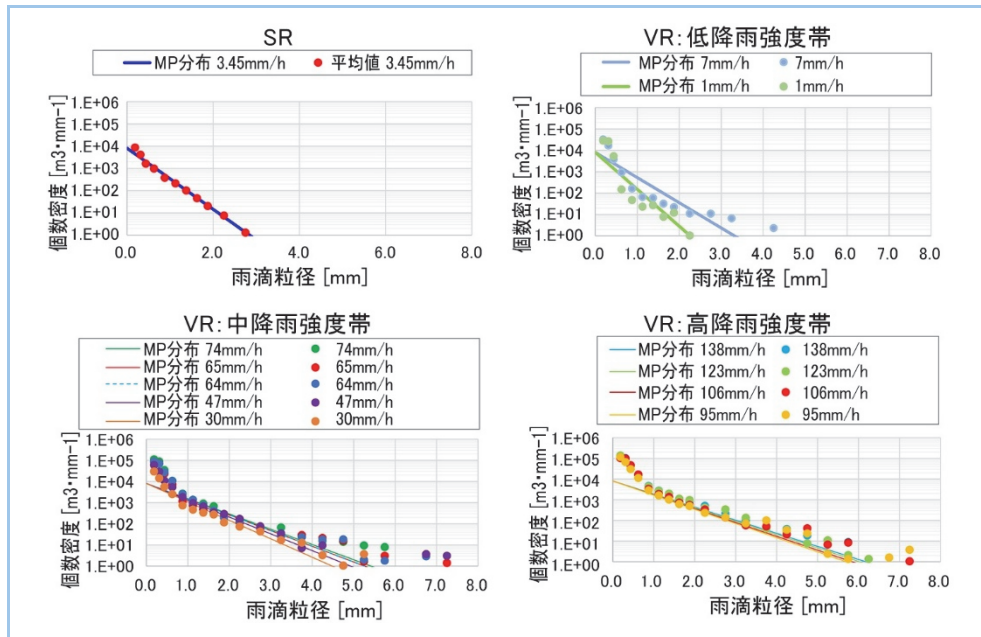


図5 屋外観測データの雨滴粒径分布

屋外で観測した雨滴個数密度とMP分布の比較

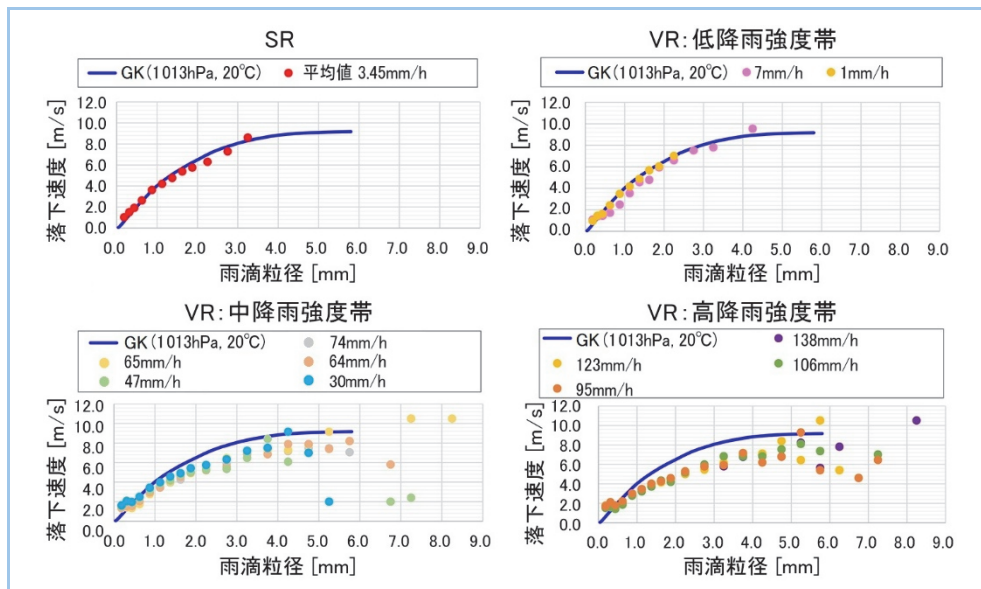


図6 屋外観測データの雨滴落下速度分布

屋外で観測した落下速度分布とGK曲線との比較

4.2 EMと屋外の対応付け

屋外の観測データとEMで取得した降雨データを比較した。EMは、降雨特性が異なるA系統(小粒径の雨滴が支配的)とB系統(大粒径の雨滴を含む)の2系統の雨を模擬できる。両系統について、中降雨強度帯(2点)と低降雨強度帯(2点)のデータを採用し、それぞれの地点の雨滴分布と落下速度のデータを屋外の観測データと比較した。

EMのA系統の雨と屋外観測データとの比較を図7に示す。低降雨強度の雨滴粒径分布(上段右側)は、粒径1mmを超える範囲ではMP分布からの大きな乖離がなく、屋外のSRの時間平均値とも高い整合性を示した。一方、粒径1mm以下では、MP分布及び屋外観測データとの差異が認められた。この粒径領域は、雨量や77GHz帯の電波減衰への寄与が大きい可能性があるため、屋内外の対応関係を評価する上で重要である。したがって、A系統の雨は低降雨強度の自然降雨と概ね近い分布特性を示すものの、粒径1mm以下の雨滴数については追加の検証が必要である。一方、時間変化の大きいVRの中降雨強度帯とA系統の雨滴粒径分布(上段左側)には、大きな差異が認められた。A系統では、雨滴個数は雨滴粒径が2.0mmより小さい場合はVR

よりも大きく上振れしているが、雨滴粒径が 2.0mm よりも大きい場合は VR よりも極端に少なくなり、3.0 mm 以上の雨滴は確認されなかった。また、MP 分布とも大きく異なる傾向を示した。落下速度分布(下段)については、A 系統では屋外観測データよりも全体的に落下速度が抑制され、粒径が増加しても速度の上昇は限定的であった。この傾向は、中降雨強度側でより顕著であった。

次に EM のB系統の雨と屋外の観測データとの比較を図 8 に示す。雨滴粒径分布(上段)の形状は、A 系統の雨よりも屋外観測データと類似している。特に中降雨強度(上段左側)で 2.0mm 以上の雨滴が存在しており MP 分布にも従っている点が特徴である。落下速度分布(下段)についても、A 系統と同じく屋外観測データよりも全体的に抑制されているものの、VR の中降雨強度帯の落下速度に近づいていることが確認できる。

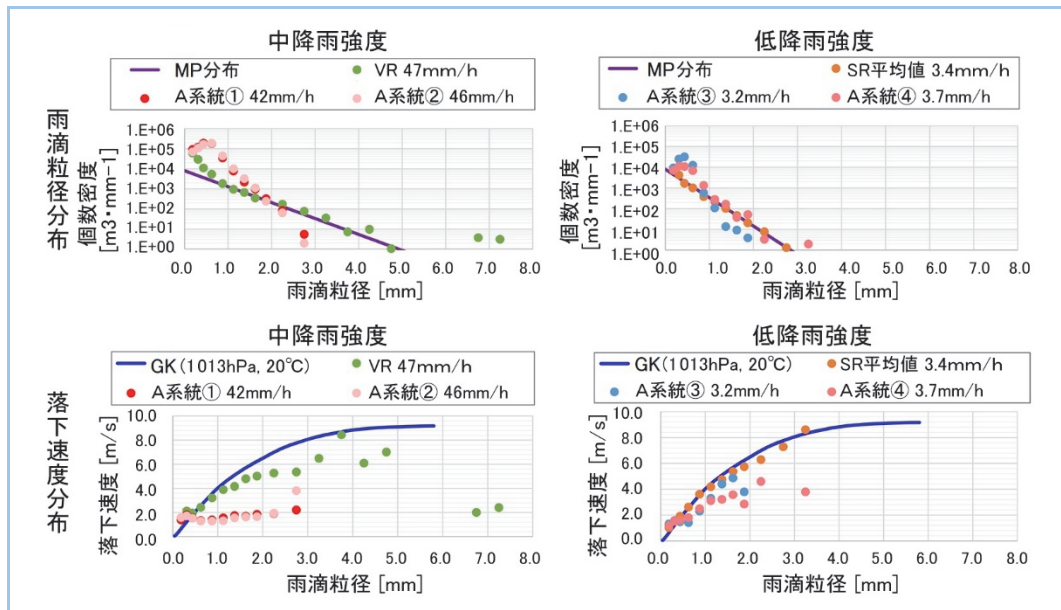


図7 EM(A 系統)と屋外観測データの比較

上段: 雨滴粒径分布を MP 分布及び、屋外の観測データと比較

下段: 落下速度分布を GK 曲線及び、屋外の観測データと比較

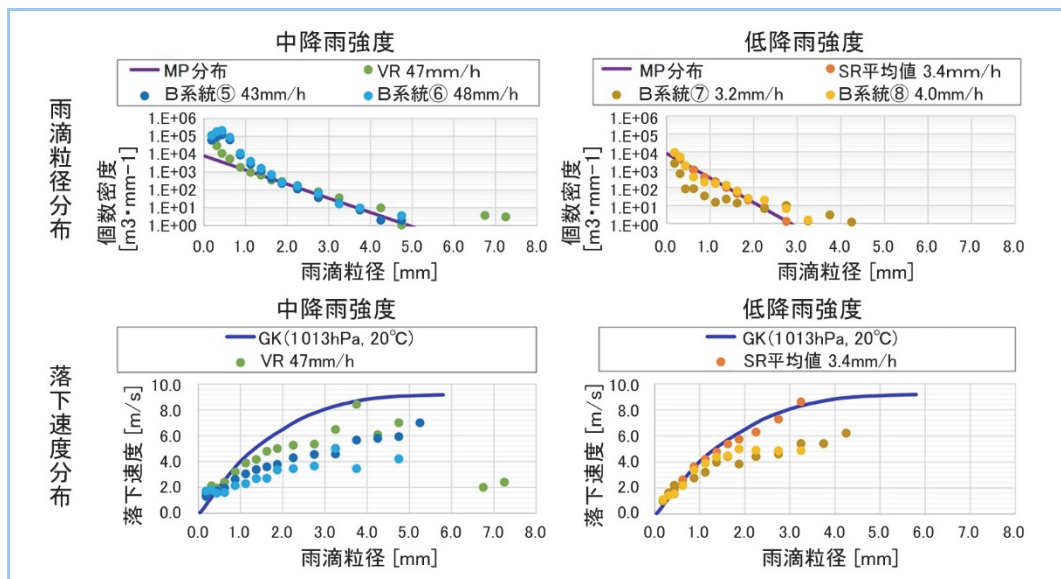


図8 EM(B 系統)と屋外観測データの比較

上段: 雨滴粒径分布を MP 分布及び、屋外の観測データと比較

下段: 落下速度分布を GK 曲線及び、屋外の観測データと比較

4.3 対応付け結果の評価・考察

図 5～図 8 に示した結果から、屋内模擬環境と実環境の対応付けにおいては、降雨強度だけでなく、雨滴粒径分布及び落下速度分布を組み合わせる評価することが重要であることが明らか

となった。低降雨強度領域では、屋外の降雨特性が MP 分布及び GK 曲線とよく一致し、EM の降雨環境も一部の粒径領域及び大粒径側の落下速度を除いて近い特性を示した。一方、粒径 1mm 以下の雨滴数には屋内外で差異が認められ、この粒径領域は特定の周波数帯の電磁波に対する減衰寄与が大きい可能性があるため、対応付けにおける重要な評価対象である。また、中～高降雨強度帯では、屋外観測データも MP 分布及び GK 曲線から乖離し、EM では落下速度の抑制がさらに大きく現れた。したがって、仮想試験環境を加えた試験エコシステムの構築には、3 つの環境間における相関分析及び統合的な評価が必要である。また、自然界で観測された大粒径領域における落下速度のばらつきには、外風等による実環境の変動に加え、大粒径雨滴の計測数が少ないことや、ディストロメータの計測原理に起因する影響が含まれる可能性がある。ディストロメータの計測値には、検出領域の端部を通過する雨滴や、複数雨滴の同時通過等に起因する誤検出が含まれる可能性があるためである。本報では、屋内外データに対して雨滴の粒径と落下速度に基づく品質管理処理(理論値からの外れ値を除外する処理など)を適用していないため、観測された粒径分布及び落下速度分布については、気象現象だけでなく、計測上の不確かさも考慮して解釈する必要がある。一方、EM では自然界と類似した傾向を示しつつも、落下速度の抑制がより早く現れた。その一因として、雨ノズルを設置した実証試験設備の天井高さに制約があり、雨滴が終端速度に達する前に計測されている可能性がある。また、自然降雨を前提とした品質管理条件を EM の模擬降雨へそのまま適用することはできない。このため、定量的な対応関係を確立するには、屋内外データを共通に評価できる品質管理方法の検討に加え、必要に応じて異なる計測原理による雨滴粒径分布の追加検証も必要である。

以上より、EM の降雨条件と屋外実環境との間に類似する特性及び差異が存在することを確認し、対応付けに必要な評価指標と留意点を明らかにした。本報の検討は、屋内外の定量的な対応関係を確立するための一段階であり、悪天候下における安全性評価の信頼性向上に向けた基礎を構築するものである。

5. まとめ

本報では、屋内模擬環境と屋外実環境の対応付けに基づく自律型モビリティ評価基盤の構成を示し、降雨環境における屋内試験条件の妥当性を検証した。その結果、低降雨強度領域では屋内模擬環境が自然界に近い特性を再現できる一方、中降雨強度領域では自然界と同様の傾向を示しつつも定量的な差異が存在することを確認した。これにより、降雨強度に加え、粒径分布及び落下速度分布を用いた多指標評価が、屋外実環境との対応関係を判断する上で有効であることを示した。また、屋外実環境で約 2 年間にわたって計測し続けて得たデータが EM では 4 日間の試験で得られたことを NPL/Met Office から確認しており、試験エコシステムにおける効率的なデータ取得手段としての有用性を示した⁽⁴⁾。よって、本報の成果は、屋外気象試験場と屋内気象模擬試験場の気象計測データを接続し、将来の仮想試験環境における気象モデル構築に資するものである。ただし、得られた対応関係は本報で取得した屋外実環境データの範囲に基づく知見であり、ディストロメータの品質管理条件が評価結果に及ぼす影響についても検証課題である。今後は、霧条件を含む他の悪天候条件への適用拡大、評価指標の充実、及び標準化や評価サービス展開を見据えた評価手法の高度化を推進予定である。

謝辞

本報の遂行に当たり、NPL 及び Met Office には、屋外観測データをご提供いただくとともに、評価手法の考え方、ならびに標準化に向けた取組みに関する多くの知見と有益なご示唆を頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- (1) Met Office and National Physical Laboratory, Assessing the ODD of AV Perception Sensors with Confidence, Sensor Assurance Framework project, Final Version: May 2024.
- (2) National Physical Laboratory and Met Office, Proof of Concept Study: A Framework for the Reliable Testing of CAV Sensor Performance and Degradation in Different Weather Conditions, First Revision: May 2021.
- (3) 中山ら, 気象特性データを活用した自律型モビリティ安全性評価の革新, 三菱重工技報 63 巻 3 号
- (4) Smith, J. et al., Impact of UK Weather on Autonomous Vehicle Radar, LiDAR and Camera Vision Systems, Sensors, Vol.26, No.17 (2026), 5649.
- (5) Marshall, J.S. and Palmer, W. Mc K., The Distribution of Raindrops with Size, Journal of Meteorology, Vol.5, No.4 (1948), pp.165-166.
- (6) Gunn, R. and Kinzer, G.D., The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air, Journal of Meteorology, Vol.6, No.4 (1949), pp.243-248.