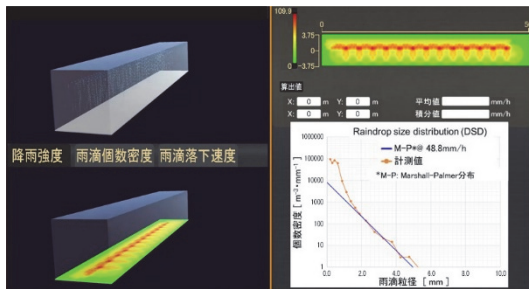


気象特性データを活用した自律型モビリティ安全性評価の革新

Innovation of Autonomous Mobility Safety Evaluation: Utilization of Meteorological Characteristic Data



中山 悠*¹
Haruka Nakayama

吉見 一真*²
Kazuma Yoshimi

清水 裕量*³
Hirokazu Shimizu

日根野 義克*⁴
Yoshikatsu Hineno

自動運転システムは、世界的に精力的な開発が進められており、今後の飛躍的な性能向上と普及が見込まれている。その安全・安心を保証するためには、多様な自然環境下(雨, 霧, 光, 雪など)においてセンサやシステムが正常に機能することを検証する必要がある。三菱重工機械システム株式会社では、この検証ニーズの高まりを見込み、自律型モビリティの評価システムである屋内型の統合環境試験システムを開発した。本報では、同一降雨強度でも雨滴粒径分布が異なる2つの降雨環境を生成しLiDARへの影響を比較した結果、反射強度の低下率が降雨環境によって異なる事例を紹介し、詳細な気象特性データを考慮した評価の重要性を示す。

1. はじめに

自律型モビリティの社会実装が進む中で、安全性と信頼性を客観的かつ定量的に評価するための技術基盤の整備が重要な課題となっている。自律型モビリティでは、Camera, LiDAR, RADARなど複数のセンサを組み合わせることで周辺環境を認知しているが、降雨や霧といった気象条件はこれらのセンサ認知性能に大きな影響を及ぼす。ここで、雨滴や霧粒の粒径分布(Drop Size Distribution: DSD)によって電磁波の散乱や電磁波の減衰特性が変化するため、同一の降雨強度や霧の視程であっても粒径分布が異なる場合、センサ出力や認知結果に差が生じることが報告されている⁽¹⁾。

一方、悪天候下でのセンサ性能評価に利用されている既存の気象模擬設備では、天井のノズルからの単位時間あたりの総水量を試験エリア面積で除した平均降雨強度や、少数の視程計の時間平均値で空間全体の視程を代表している設備も多い。そのため、降雨強度や霧による視程の空間的な分布や時間的変動、ならびに粒径分布といった詳細な気象特性を十分に反映した評価が難しく、各センサの応答特性や定量的な相関関係を把握する上での制約となっている。

本報では、統合環境試験システムで取得した高解像度の降雨強度や粒径分布などの気象特性データを活用した、LiDAR認知性能の評価事例を紹介する。また、高解像度の特性データを活用する事により、センサ信号強度の減衰量推算や、センサ認知機能のシミュレーションモデル精緻化も実現可能であることを示す。

*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 新事業開発部 主席 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 三菱重工機械システム株式会社 設備インフラ事業本部 制御システム技術部 主席チーム統括 技術士(電気電子部門)

*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

2. 気象特性データ

統合環境試験システムの降雨環境は、降雨強度に加えて、自然界で観測される雨滴粒径分布及び落下速度特性を模擬し、これら降雨特性データの空間分布を取得可能である。同一の降雨強度条件下においても、“小粒径の雨滴が支配的”や“大粒径の雨滴を含む”といった粒径分布の違いを考慮した試験条件を設定でき、粒径分布の違いがセンサ認知性能に与える影響を体系的に評価できる。また、霧環境は、コンピュータシミュレーションと独自の制御技術を組み合わせることで、視程 200m から 10m までを任意に再現・安定的に維持し、視程の経時変化データを取得できる。なお、霧模擬の詳細については参考文献(2)を参照されたい。本報では降雨環境に着目する。

図 1 は統合環境試験システムの実証試験設備の概要図であり、設備内部にディストロメータ(図 2)を設置し雨滴の粒径分布、落下速度を取得している。降雨特性が異なる雨 A と雨 B の粒径分布と落下速度分布の代表例を図 3 に示す。橙色が計測値であり、参考として Marshall-Palmer 分布(自然界の雨滴分布の代表的なモデル)⁽³⁾と Gunn-Kinzer 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)⁽⁴⁾を青線で示す。ここで計測値の落下速度が終端速度に達していないのは、雨ノズルを設置した実証試験設備の天井高さによる制約に起因するが、必要に応じて粒径ごとの終端速度との比率に基づく補正を適用することで自然降雨への対応付けも可能である。また、雨量の計測升やディストロメータの設置位置を変えることで、降雨特性データの空間分布を取得できる。具体例として、図 4 に降雨強度の空間分布を示す。センサとターゲットの配置を変えることで様々な降雨強度の試験体系を効率的に構築できる他、特性データの空間的なバラつきとセンサ認知の相関関係も分析可能である。

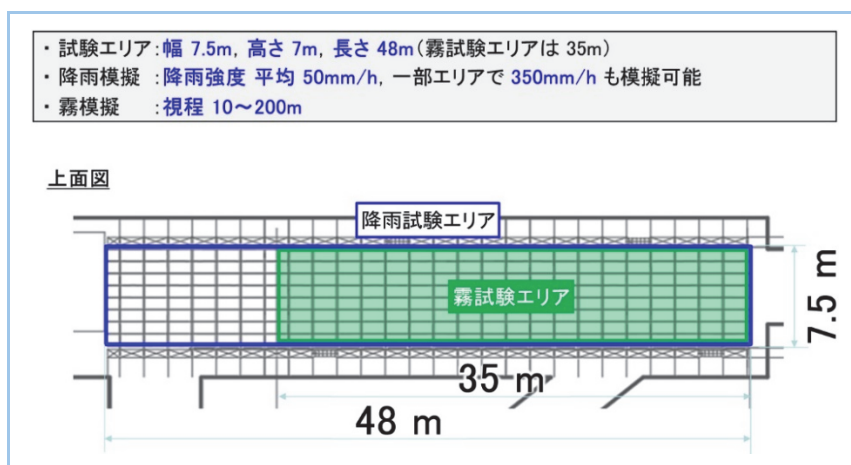


図1 実証試験設備(平面視)

降雨・霧 模擬の技術検証やセンサの認知性能評価が可能

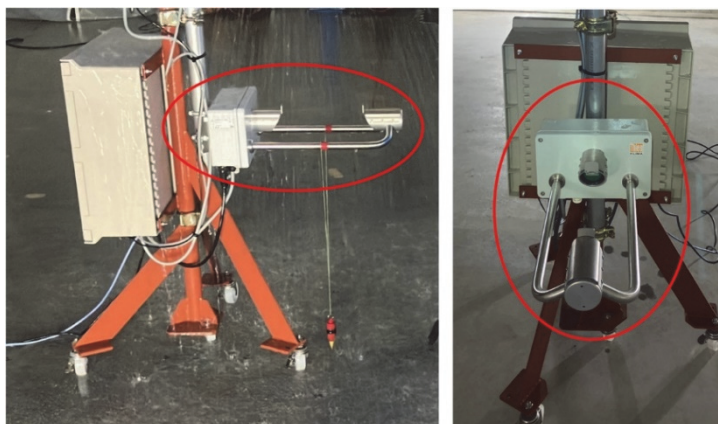


図2 ディストロメータ

粒径分布, 落下速度を計測

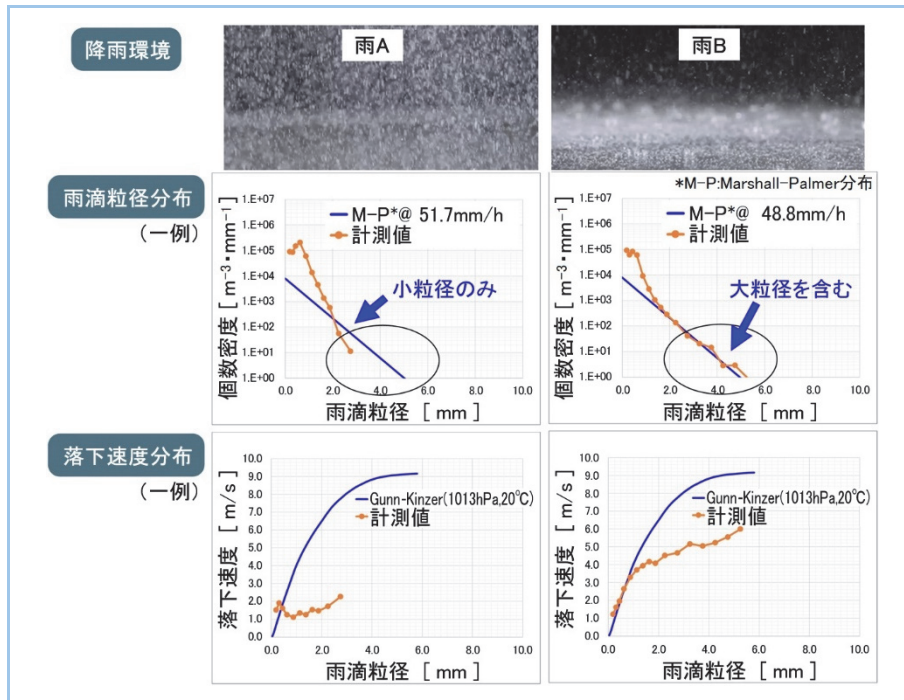


図3 降雨特性の異なる雨の雨滴粒径分布と落下速度分布

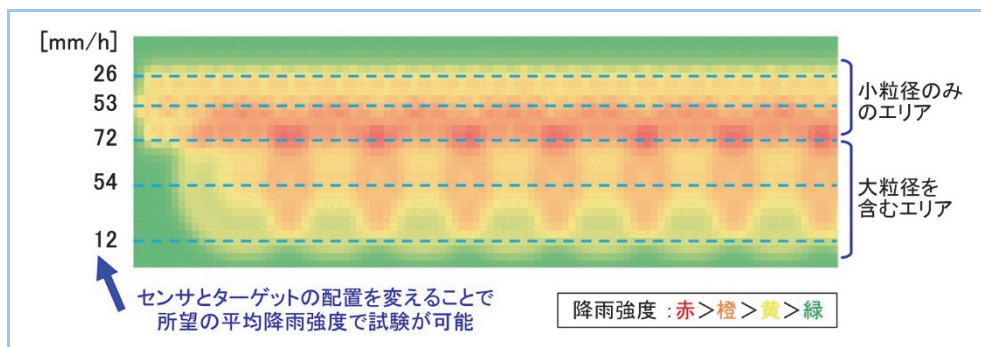


図4 降雨エリア平面視の降雨強度分布

小粒径エリアと大粒径エリアの同時降雨時

3. 悪天候下でのセンサ信号強度減衰

3.1 粒径分布と散乱・消散特性

降雨や霧などの悪天候環境におけるセンサ信号強度の減衰は、空間中に存在する水滴による電磁波の散乱及び吸収に起因する。粒径が電磁波の波長と同程度である場合、この散乱現象はミー散乱理論により記述される。さらに、Camera, LiDAR, RADAR のように用いられる電磁波が異なる場合であっても基本的な物理機構は共通である。ミー散乱理論では、個々の粒子による散乱・吸収特性は粒子の粒径と電磁波の波長の相対関係に依存し、粒子群全体としての減衰特性は粒径分布 $N(D)$ により決定される。粒径分布を考慮した消散係数 α は、粒径ごとの消散断面積の重ね合わせとして以下のように表される。

$$\alpha = \int_0^{\infty} N(D) \sigma_{ext}(D, \lambda) dD$$

ここで、 $N(D)$ は粒径分布、 σ_{ext} は個々の粒子による光の散乱及び吸収の総和としての消散断面積であり、ミー散乱理論に基づき粒径及び波長の関数として与えられる。

降雨環境に着目すると、粒径分布は降雨の微視的構造を表す指標であり、降雨強度 R は、雨滴直径 D 、落下速度 $v(D)$ 、及び粒径分布 $N(D)$ を用いて以下のように表される。

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} D^3 v(D) N(D) dD$$

この式より、同一の降雨強度であっても粒径分布が異なる場合には、粒径及び個数密度の異なる組合せにより同じ降雨強度が成立していることが分かる。

以上より、同一の降雨強度 R であっても、粒径分布が異なる場合には消散係数 α が変化し、結果としてセンサ信号強度の減衰特性も異なることがわかる。

3.2 空間分布を考慮した減衰量算出

悪天候環境は空間的に一様ではなく、粒径分布や降雨強度、霧の視程は位置及び時間によって変動する。伝搬経路を微小区間 Δr_i に分割し、各区間 i における粒径分布から消散係数 α_i を算出することで、空間分布を考慮した減衰量を評価する。全体の減衰率 A は以下のように離散的に表される。

$$A = \exp\left(-2 \sum_i \alpha_i \Delta r_i\right)$$

ここで、 Δr_i は空間セルの解像度である。本手法により、降雨の空間的不均一性を反映したセンサ信号強度の減衰評価が可能となる。なお、LiDAR はターゲットに反射した光を受光して認知するため、減衰率を2倍(往復分)している。本報では、統合環境試験システムにより取得した3分間の降雨特性データを時間平均化し、1m以下の空間分解能で再現した雨滴粒径分布の空間座標データを用いる。

3.3 LiDAR 信号強度減衰モデル

LiDAR 信号強度は、放射伝達に基づく LiDAR 方程式により記述される。本報では、降雨による減衰影響に着目し、クリア(降雨なし)条件に対する相対評価として、以下のモデルを用いた。

$$P(r) = P_0 \exp\left(-2 \int_0^r \alpha(s) ds\right)$$

ここで、 $P(r)$ は距離 r における受信信号強度、 P_0 はクリア条件における信号強度、 $\alpha(s)$ は位置 s における消散係数である。消散係数を3.2節で求めた離散近似することで、不均一な降雨環境下におけるLiDAR信号強度の減衰を定量的に評価する。また、減衰率は以下のようにクリア条件との比率で評価する。

$$A(r) = \frac{P(r)}{P_0}$$

なお、本報で用いた減衰モデルは、物理現象の一次的な影響を評価することを目的とし、以下の仮定を置いている。

- ・ 減衰要因は前方散乱及び空間的な消散に限定する
- ・ 後方散乱及び多重散乱の影響は考慮しない
- ・ センサ内部の信号処理や認識アルゴリズムの影響は含まない

このため、本モデルは主としてセンサ信号強度の減衰特性の評価に適用されるものであり、偽点の検出や点群全体を考慮した認知などの高次現象の評価には適用できない。

4. 降雨環境下における LiDAR 認知性能評価

4.1 試験結果

図5に示す対象物(ターゲット)をLiDAR(波長865nm)の前方35mに固定し、評価線上の平均降雨強度を53mm/hに設定した上で、雨滴の粒径分布及び落下速度分布が異なる降雨環境(雨A、雨B:図3参照)で試験を実施した。LiDARの認知性能は、取得された点群データ(図6)からターゲットに該当する検知点を抽出し、その反射強度(受信信号強度)を評価指標とした。低

下率は、降雨条件下で取得した値を、降雨なし条件の値で正規化することで算出した。なお、本試験では降雨によるターゲット検知状況変化の代表的傾向を評価するため、約9秒間(90フレーム)の計測データを統合し、全検知点に対する反射強度の中央値を指標として用いた。95%信頼区間で統計的に評価した結果、大粒径雨滴を含まない雨 A では、対象物に起因する反射強度及び検出点数の双方において降雨なし条件と比較して有意な差が観測された。具体的な数値は、図7で示すように降雨なし条件と比較して、反射強度は91%低下した。一方で、大粒径雨滴を含む雨 B では、反射強度は低下率43%(有意差あり)であった。この結果は、同一の降雨強度条件であっても、雨滴粒径分布の違いによってLiDARが受ける認知性能への影響程度が異なることを示している。特に、小粒の雨滴が支配的な雨 A では弱い散乱が多数発生することでLiDAR信号強度の減衰が生じる。一方、雨 B では大粒の雨滴が強い散乱を引き起こすものの、雨滴数が少ないため影響が局所的になりやすい。また、雨滴径0.2~2mmの範囲では粒径が小さいほど消散係数が大きくなるため、小粒径を多く含む雨 A の方が信号強度の減衰への寄与が大きいと考えられる。ただし、0.1mm以下では消散係数に低下傾向がみられるため、減衰特性は雨滴数だけでなく粒径分布にも依存する。

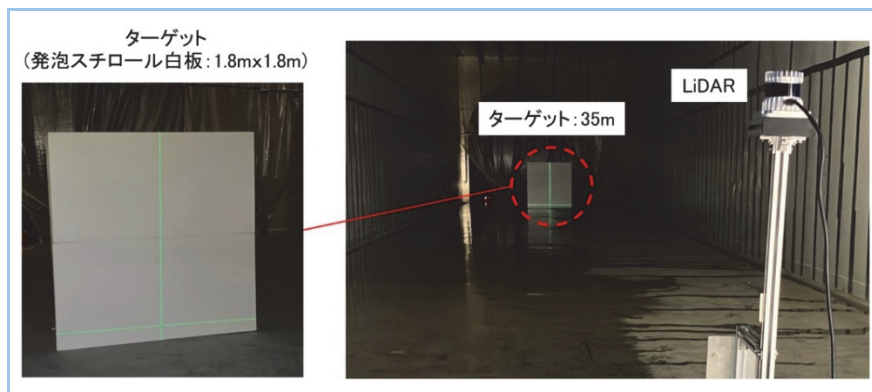


図5 LiDAR 認知性能評価試験

対象物(ターゲット)をLiDARの前方35mに固定

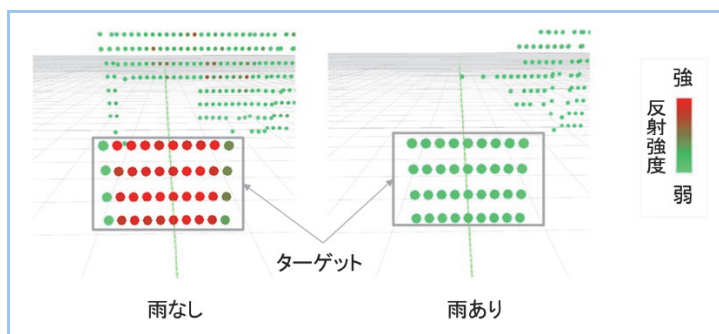


図6 LiDARによる点群処理結果

ターゲットに該当する検知点座標を抽出

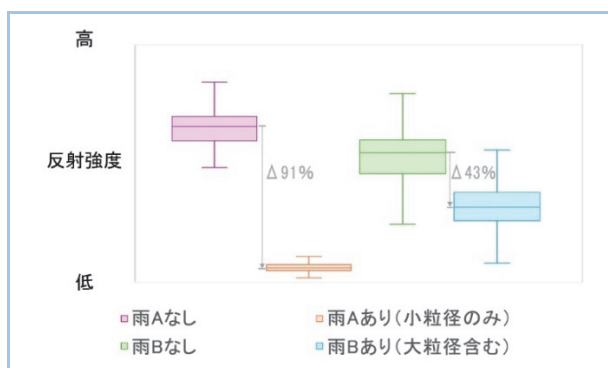


図7 降雨環境下におけるLiDAR 認知性能の影響

雨なし条件を100%とした時の反射強度の低下率

4.2 信号強度減衰量のシミュレーション結果

本節では、降雨環境下における LiDAR の信号強度減衰について、試験結果とシミュレーションによる推算結果を比較し、空間座標ごとの雨滴分布を用いた評価手法の妥当性を検証した。シミュレーションには、3 章で示した消散係数に基づく空間減衰モデルを適用した。具体的には、雨滴による前方散乱及び減衰をミー散乱理論に基づいて定式化し、LiDAR 波長に対する粒径ごとの消散係数を算出した。さらに、統合環境試験システムで取得した降雨環境データのうち、1m 以下の空間解像度で取得した雨滴粒径ごとの個数密度を入力とし、各空間セルにおける消散係数を求めた。これを LiDAR とターゲット間の光路に沿って積分することで、往復分の減衰を考慮した信号強度減衰率を推定した。

表 1 に示すように、シミュレーション結果(雨 A:95%、雨 B:60%)は試験結果(雨 A:91%、雨 B:43%)と同様の減衰傾向を示しており、粒径分布に依存した減衰傾向が適切に再現されていることが確認された。特に、大粒径雨滴を含まない雨 A では反射強度の低下が顕著であり、これは粒子数密度の増加に伴う空間的な消散の増大として解釈でき、この傾向はシミュレーションにおいても同様に再現されている。一方、大粒径雨滴を含む雨 B については、試験結果とシミュレーション結果の間に約 17%の差異が確認された。この差異は、シミュレーションモデルが前方散乱及び空間的減衰を主に評価対象としているのに対し、実環境では大粒径雨滴に起因する後方散乱や多重散乱、さらにセンサ内部の信号処理やノイズ特性の影響が相対的に顕在化しやすいことが考えられる。また、大粒径雨滴は個数密度が低い一方で散乱断面積が大きく、局所的な散乱寄与が支配的となる。このため、雨滴数のばらつきに起因する信号変動や統計的な不確かさが増大し、試験結果との乖離を拡大させた可能性がある。

以上より、本手法は粒径分布に基づく減衰傾向の評価には有効であるものの、大粒径雨滴を含む環境では、散乱の角度分布や高次散乱過程の再現に課題が残ることが示唆された。

表1 LiDAR 反射強度(中央値)の減衰率

環境	雨 A 小粒径のみ	雨 B 大粒径含む
シミュレーション	95%	60%
試験	91%	43%
差分(シミュレーション - 試験)	4%	17%

雨なし条件を 100%とした時の低下率

5. まとめ

本報では、統合環境試験システムにより取得した降雨特性データを活用し、自律型モビリティに搭載される LiDAR の認知性能評価事例を紹介した。雨滴粒径分布を考慮することで、平均降雨強度のみでは評価できない試験体系の有効性を示した。さらに、高解像度の空間分布データを用いた信号強度の減衰シミュレーションは、試験計画及び結果解釈に有効であり、高度なセンサ認知シミュレーションモデルの精度向上にも寄与する。本システムは繰り返し再現性の高い環境生成が可能であり、気象特性データを介して試験とシミュレーションの条件統一及び解析検証に活用できる点に特徴がある。一方で、本評価は特定の LiDAR を対象としており一般化には限界がある。また、現行のシミュレーションモデルは前方散乱と空間減衰に限定され、後方散乱や認識アルゴリズムの影響は考慮していない。今後は、気象特性データの不確かさを考慮した統計的拡張や、Camera・RADAR を含む統合モデルとの連携により、本システムの信頼性と効率性の向上を図り、自動運転の社会実装に貢献していく。

参考文献

- (1) Haider, A. et al., A Methodology to Model the Rain and Fog Effect on the Performance of Automotive LiDAR Sensors, Sensors, Vol. 23, No. 15, Article 6891, 2023

-
- (2) 中山 悠ほか, 霧模擬技術の革新: 自律型モビリティ評価システムによる高精度な霧環境の再現, 三菱重工技報 Vol.63 No.2 (2026)
 - (3) 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.
 - (4) 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.