

# 「DIVP 空間伝搬モデル ～センサーモデルを活かす空間伝搬モデルとその使い方～」

## 発表者プロフィール



■ 渡邊 龍雄

■ tatsuo.watanabe@biprogy.com



CAD/CAM/CAEプリの形状処理機能のアルゴリズム研究・開発に従事、DIVPでは電磁波の伝搬をシミュレートする空間描画処理の開発に従事しております。

## 経歴

- 2004年 日本ユニシス(現BIPROGY)入社  
CAD/CAM/CAEプリシステムの開発に従事
- 2019年 DIVPプロジェクトに参加  
空間描画処理の開発を担当

## 背景 / 目的

- ADASの安全性評価のためには、精緻なシミュレーションが重要になると考えている
- DIVPシミュレーションの根幹を為す空間描画処理の概要について紹介する

## 骨子

- DIVP空間描画の主要要素である以下の4項目について紹介する
  - 3Dモデル
  - 反射
  - 光源
  - 伝搬



# DIVP

## Driving Intelligence Validation Platform



### DIVP 空間伝搬モデル

### ～センサーモデルを活かす空間伝搬モデルとその使い方～

*Weather Forecast*

2024-4-22 BIPROGY



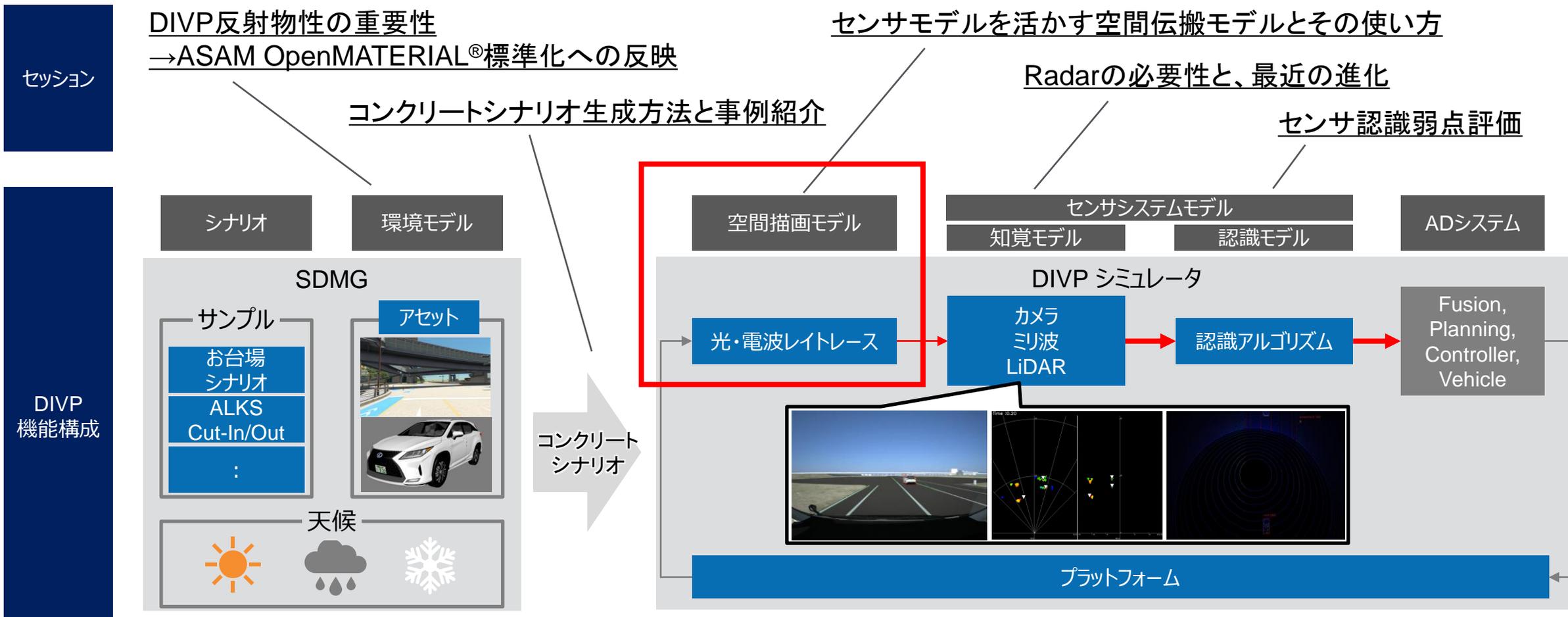
*AD\* safety Assurance*



*For Validation & Verification Methodology*

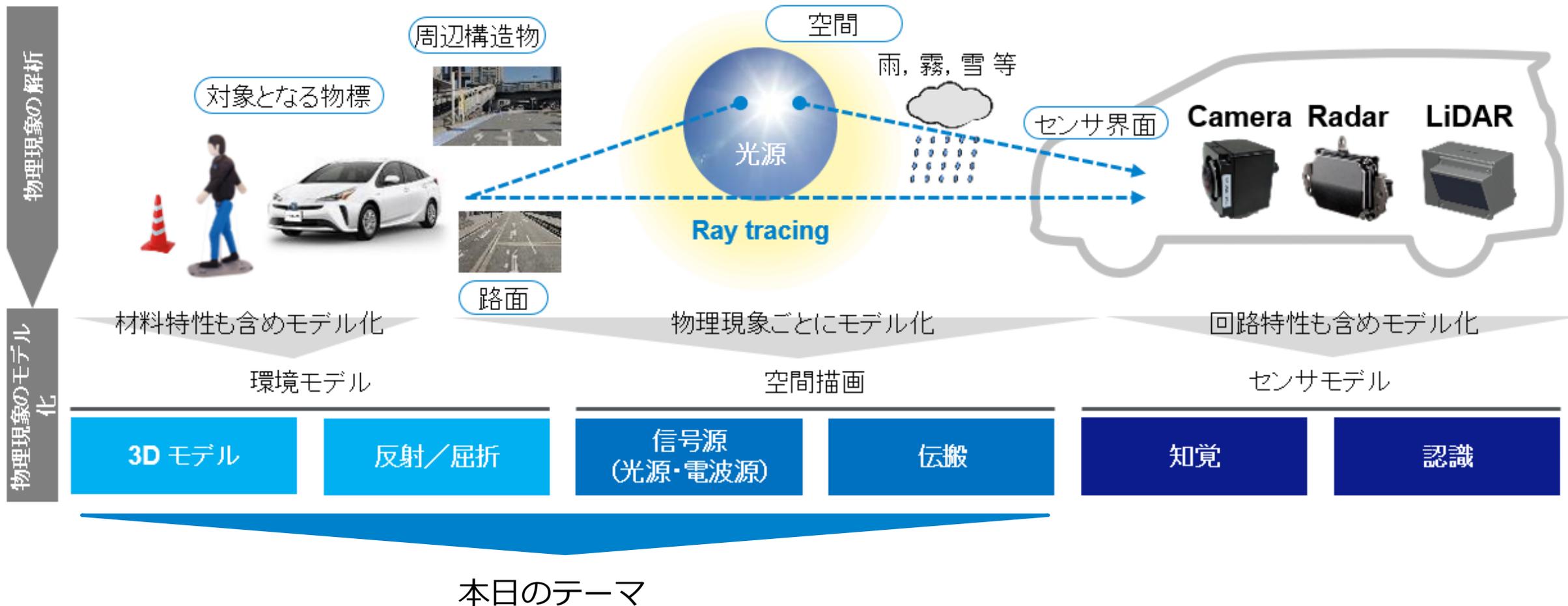
# 以降のセッションは、DIVPの機能構成に対応した技術紹介・活用事例紹介となっている

## DIVP機能構成とセッション位置づけ



# センサ出力を精緻に再現するために、センサ検出原理、使用電磁波帯域における物理現象を、原理原則に基づきモデルモデリングし、実車試験結果との突合せによる一致性検証を実施

## DIVPの空間描画モデリング



---

1	3Dモデル
2	反射
3	光源
4	伝搬

# 基本的なモデルとして乗用車、二輪車、歩行者、交通標識関係のほか、特殊車両、動物といった特殊な形状のモデル化を実施

## 3Dモデル

試験用道路



台場



首都高速道路C1



乗用車



信号機



歩行者と所持物



二輪車・特殊車両



NCAPダミー一類



交通標識・工事器具



大型車両(牽引含む)



障害物・動物



# 基本的なモデルとして乗用車、二輪車、歩行者、交通標識関係のほか、特殊車両、動物といった特殊な形状のモデル化を実施

## マップ

多目的市街地（簡易版）	首都高C1
多目的市街地（10cm精度、交差点付近のみ）	首都高C1（樹木抜き）
多目的市街地（10cm精度）	勝どき路地
特異環境試験場	交差点道路（片側一車線）
大型降雨試験場	直線道路（片側一車線）
大型降雨試験場（シャッター閉鎖/水たまり路面）	直線道路（片側一車線、車道外側線-破線）
臨海副都心台場地区（南側）	直線道路（片側一車線、車道外側線-実線）
臨海副都心台場地区（北側Area01）	直線道路（片側二車線）
臨海副都心台場地区（北側Area02）	
臨海副都心台場地区（北側Area03）	
臨海副都心有明地区（Area01）	
臨海副都心有明地区（Area02）	
臨海副都心有明地区（Area03）	



# 基本的なモデルとして乗用車、二輪車、歩行者、交通標識関係のほか、特殊車両、動物といった特殊な形状のモデル化を実施

## アクター

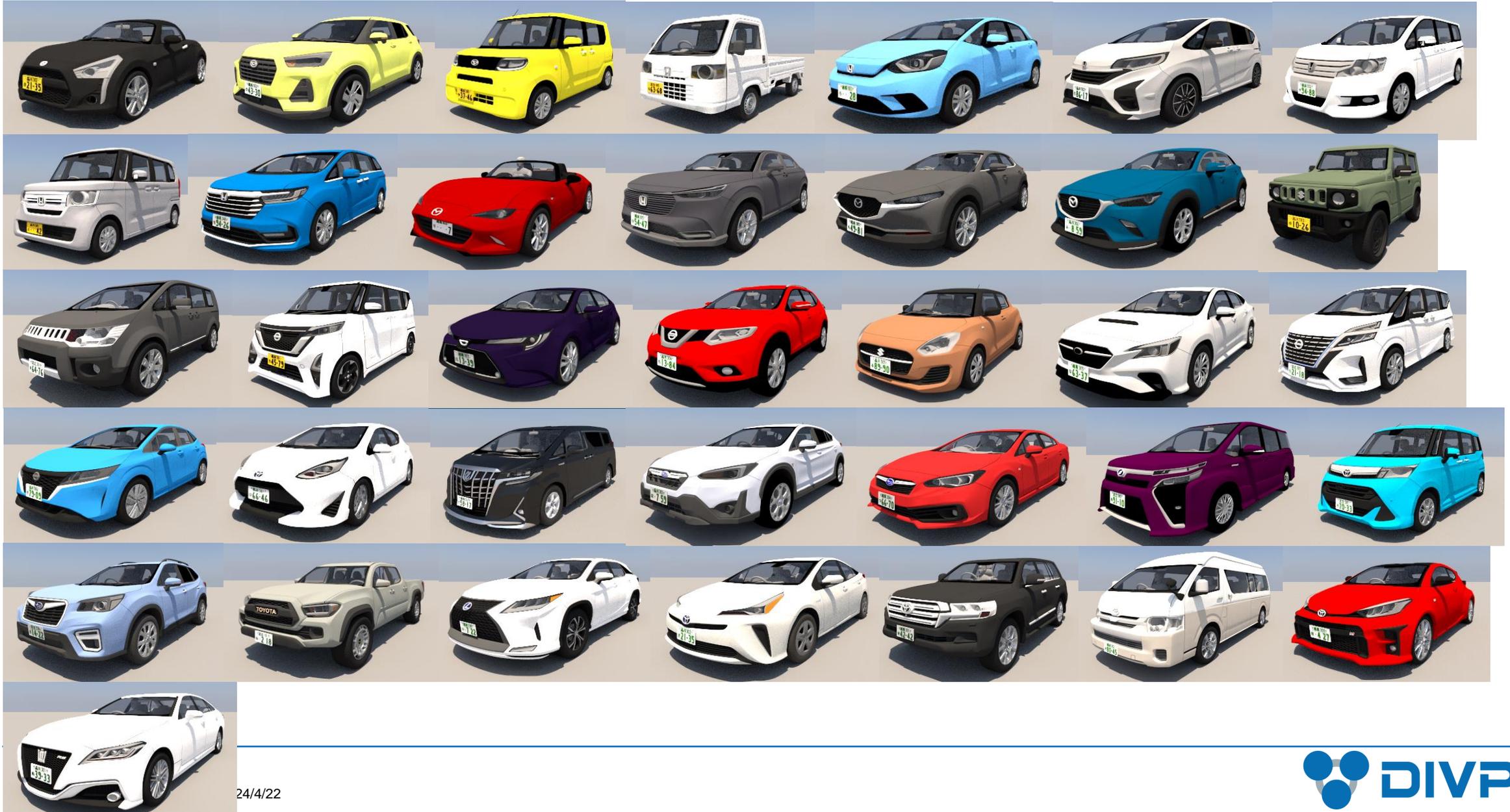
トヨタアルファード (黒)	トヨタランドクルーザー	マツダCX-3
トヨタアルファード (黒) (フロントのみ)	ホンダステップワゴン	マツダCX-30
トヨタプリウス (白)	ホンダフィット	マツダロードスター
トヨタプリウス (黒)	ホンダCB1300	ダイハツタント
トヨタプリウス (カタログモデル)	ホンダアクティ	ダイハツコペン
トヨタジャパントクシー	ホンダフリード	ダイハツロッキー
トヨタレクサスRX450hL	ホンダスーパーカブ50	いすゞエルガ
トヨタヴォクシー	ホンダN-BOX	いすゞフォワード (低床キャリアカー)
トヨタハイメディック (救急車)	ホンダオデッセイ	日野プロフィア
トヨタアクア	ホンダヴェゼル	日野レンジャー (消防車)
トヨタカローラ	日産エクストレイル	日野デュトロ (ゴミ収集車)
トヨタクラウン	日産ノート	三菱ふそうスーパーグレート (タンクローリー) トラクター
トヨタクラウン (警ら用パトロールカー)	日産ルークス	三菱ふそうスーパーグレート (タンクローリー) トレーラー
トヨタGRヤリス	日産セレナ	三菱ふそう (16輪低床トレーラー) トラクター
トヨタタコマ	スバルレヴォーグ	三菱ふそう (16輪低床トレーラー) トレーラー
トヨタタンク	スバルフォレスター	三菱ふそうスーパーグレート (タンクローリー) トレーラー (ステンレス仕様)
トヨタアルファード (カタログモデル)	スバルインプレッサG4	三菱ふそうスーパーグレート (ダンプ)
トヨタハイエース	スバルXV	スズキジムニー

# 基本的なモデルとして乗用車、二輪車、歩行者、交通標識関係のほか、特殊車両、動物といった特殊な形状のモデル化を実施

## アクター

スズキスイフト	NCAP人形（黒革ジャケット）（中分解能）	大型犬	サッカーボール
スズキアドレスV50	NCAP人形（黒革ジャケット）（高分解能）	猫	A型バリケード
テスラModel3	NCAP子供人形	小型犬	ガードフェンス
アウディA3スポーツバック	E-Scooter	カラーコーン	コンクリートブロック
三菱デリカD:5	PTW	ボール	金属製矢印板
ロータススーパー7	大人1（男性）	道路紙（キャッツアイ）	樹脂製矢印板
モーガンプラス8	大人4（男性）	ダンボール	ポテトチップスの袋
エアストリームキャラベル20FB	大人2（女性）	マンホール	工事看板
SMC Fun-Kart50（公道走行用カート）	大人3（女性）	ランプ	一斗缶
NCAP自転車（低分解能）	大人4（女性）	サーチライト（ライト部分のみ）	横臥者
NCAP自転車（中分解能）	大人5（女性）	反射板（板状）	バルーン照明器（工事用作業灯）
NCAP自転車（高分解能）	老人1（男性）	反射板（錘状）	H鋼
NCAP人形（低分解能）	老人1（女性）	障害物用タイヤ	ショッピングカート
NCAP人形（中分解能）	老人2（女性）	フリッカ光源	三角標示板
NCAP人形（高分解能）	子供2（男性）	グレーチャート	誘導ロボット
NCAPダミーバレーン	子供1（女性）	カラーチェッカー	誘導ディスプレイ
NCAPダミー車両（GST）（低分解能）	自転車 大人（男性）	IR反射ボード 反射率5%	動物死骸
NCAPダミー車両（GST）（中分解能）	自転車 子供（男性）	IR反射ボード 反射率50%	ドローン
NCAPダミー車両（GST）（高分解能）	自転車 大人（女性）	IR反射ボード 反射率94%	発炎筒
NCAP人形（黒革ジャケット）（低分解能）	鹿	黒背景ボックス 100x100x100[m]	誘導員

# 基本的なモデルとして乗用車、二輪車、歩行者、交通標識関係のほか、特殊車両、動物といった特殊な形状のモデル化を実施



# 基本的なモデルとして乗用車、二輪車、歩行者、交通標識関係のほか、特殊車両、動物といった特殊な形状のモデル化を実施



# 基本的なモデルとして乗用車、二輪車、歩行者、交通標識関係のほか、特殊車両、動物といった特殊な形状のモデル化を実施



# 基本的なモデルとして乗用車、二輪車、歩行者、交通標識関係のほか、特殊車両、動物といった特殊な形状のモデル化を実施



---

1 3Dモデル

2 反射

3 光源

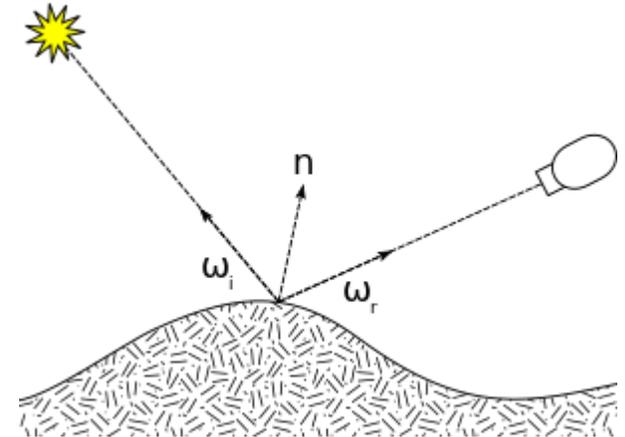
4 伝搬

# 反射率

## 双方向反射率分布関数(BRDF)

反射表面上の点 $x$ に方向 $\vec{\omega}_i$ から光が入射したとき、方向 $\vec{\omega}_r$ へどれだけの光が出射するかを表す関数  
(単位は1/sr)

$$f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) = \frac{dL_r(x, \vec{\omega}_r)}{dE_i(x, \vec{\omega}_i)}$$
$$= \frac{dL_r(x, \vec{\omega}_r)}{L_i(x, \vec{\omega}_i) |\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}| d\vec{\omega}_i}$$

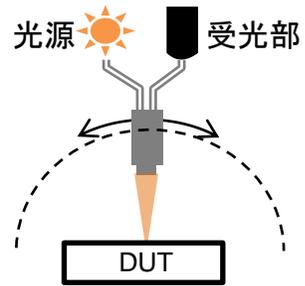
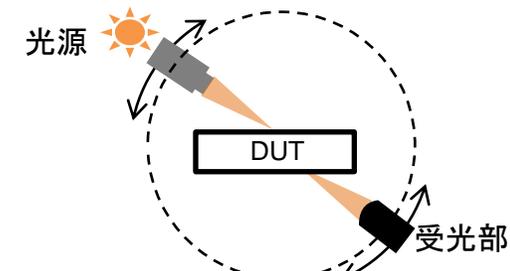


出典: Wikipedia

# 【高レベルの一致性を保証する計測技術】

各プロパティモデルは, DIVP®の高度な計測技術により、実現象と一致性が高レベルで保証されている

## 可視光・赤外光の測定系

測定条件	<ul style="list-style-type: none"><li>■ 測定波長: 360-1000nm</li><li>■ 測定角度: 光源 0度~90度</li><li>■ 受光 0度~±180度</li><li>■ 光源/受光間角度 &gt;10度</li></ul>
再帰反射	<ul style="list-style-type: none"><li>■ 光源/受光一体型の光プローブで再帰反射を直接計測</li></ul>  <p>光源 受光部</p> <p>DUT</p>
測定手法 拡散反射 拡散透過	<ul style="list-style-type: none"><li>■ 光源及び受光部を回転させて拡散反射/透過を計測</li></ul>  <p>光源 受光部</p> <p>DUT</p>

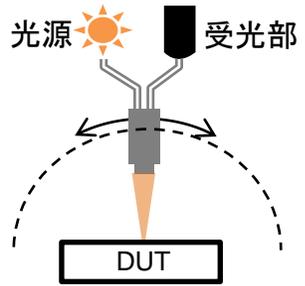
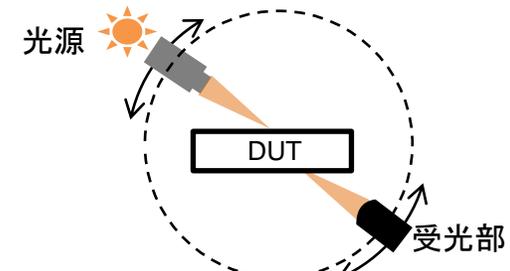
測定風景

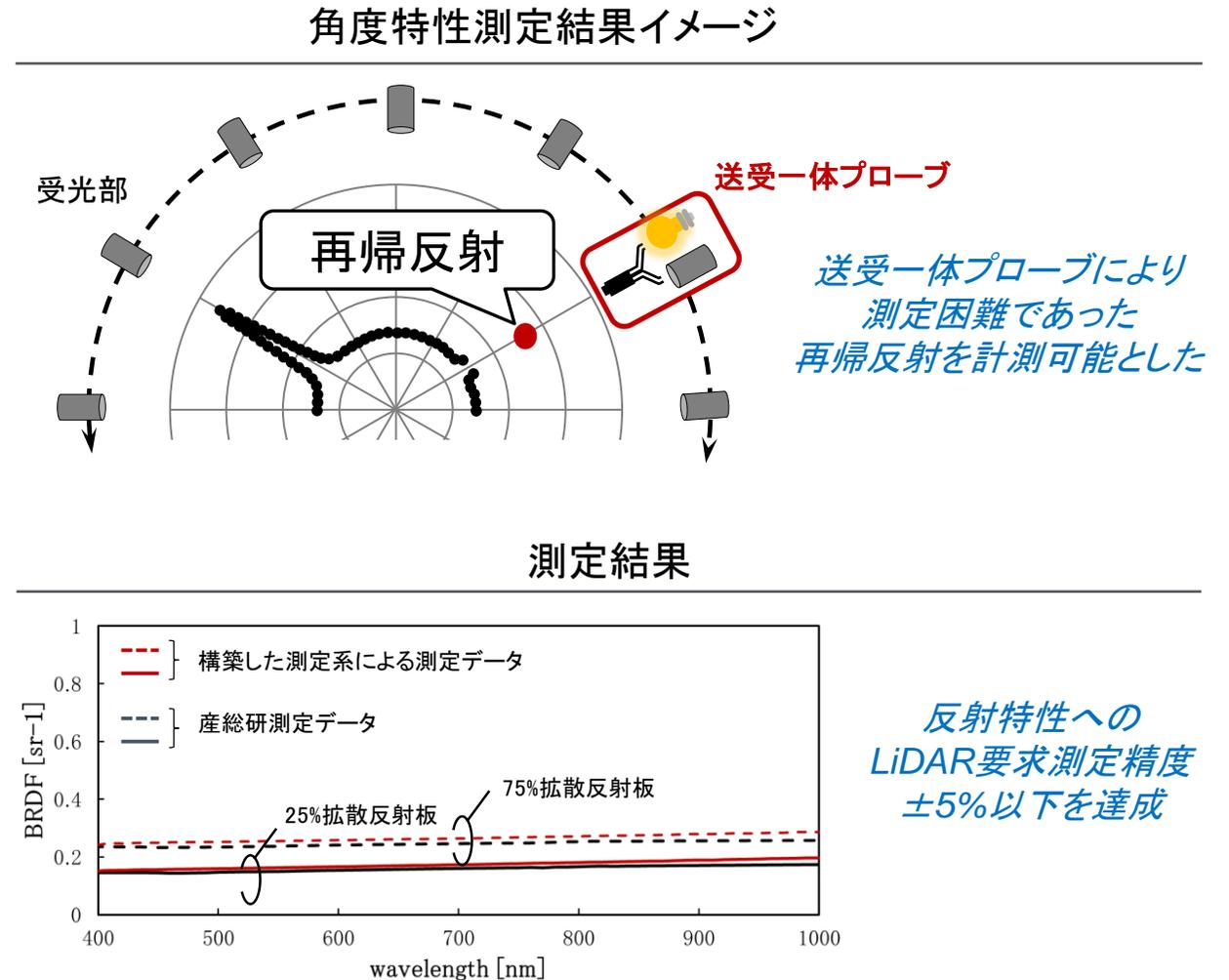


# 【高レベルの一致性を保証する計測技術】

## 測定系を設計・試作し計測を実施、センサー一致性検証に十分な測定精度を達成

### 可視光・赤外光の測定系

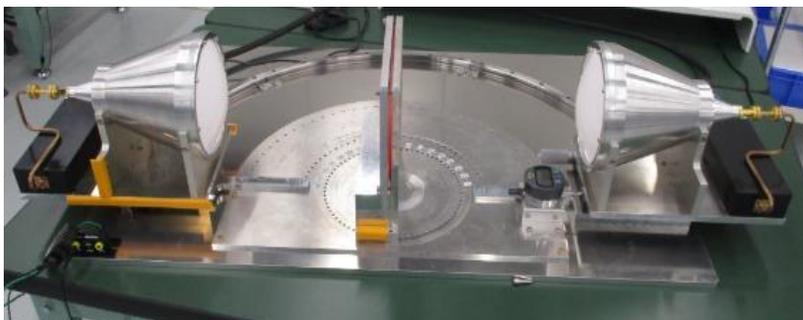
測定手法	測定条件	<ul style="list-style-type: none"><li>■ 測定波長: 360-1000nm</li><li>■ 測定角度: 光源 0度~90度</li><li>■ 受光 0度~±180度</li><li>■ 光源/受光間角度 &gt;10度</li></ul>
	再帰反射	<ul style="list-style-type: none"><li>■ 光源/受光一体型の光プローブで再帰反射を直接計測</li></ul> 
	拡散反射 拡散透過	<ul style="list-style-type: none"><li>■ 光源及び受光部を回転させて拡散反射/透過を計測</li></ul> 



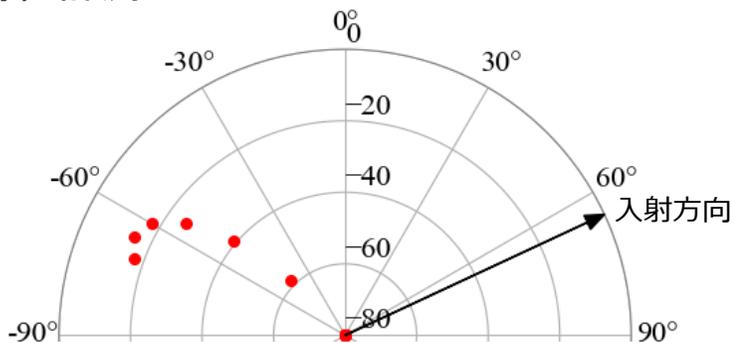
# 環境モデル構築にあたり、従来Simに見られる理論式によるモデリング手法に対し、実験計測による補間処理を行うことにより、一致性の高い反射特性を備えた環境モデリングを実現

## ミリ波の反射率データ作成の取り組み

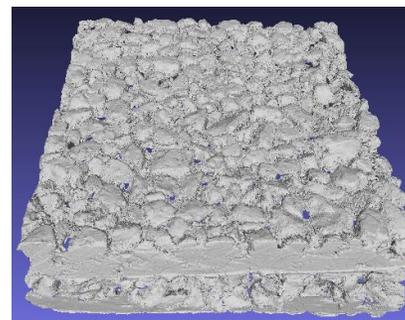
実験による特性計測



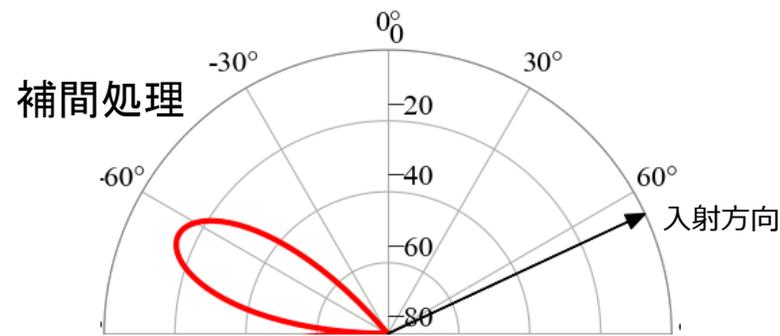
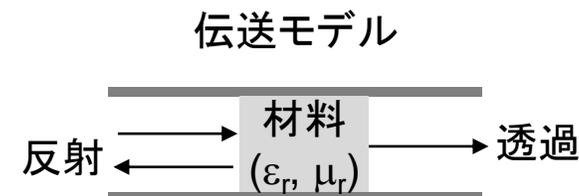
反射特性計測



計測結果に基づく理論式の補間処理



表面粗さ計測



材料の反射特性だけでなく、表面・材質特性を測定  
理論式に基づいて、補間処理して反射データを作成

---

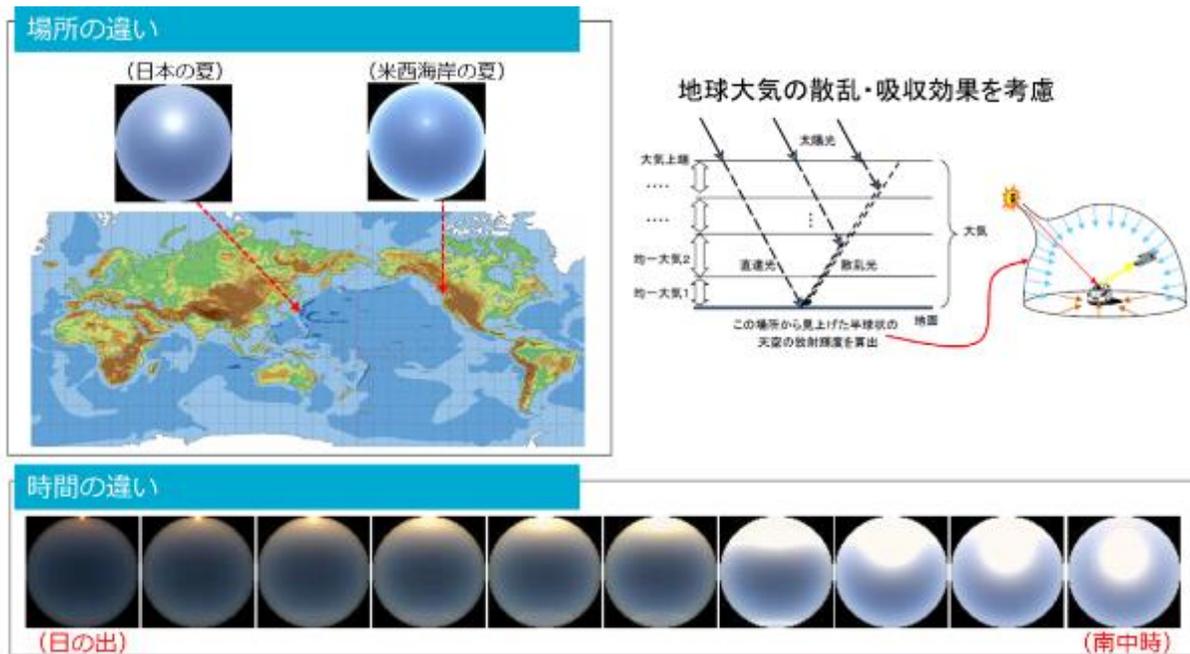
1	3Dモデル
2	反射
3	光源
4	伝搬

# 光源については実測ベースの天空光輝度特性、ヘッドランプの配光特性を利用

## 光源モデル

### 太陽光・天空光シミュレーション

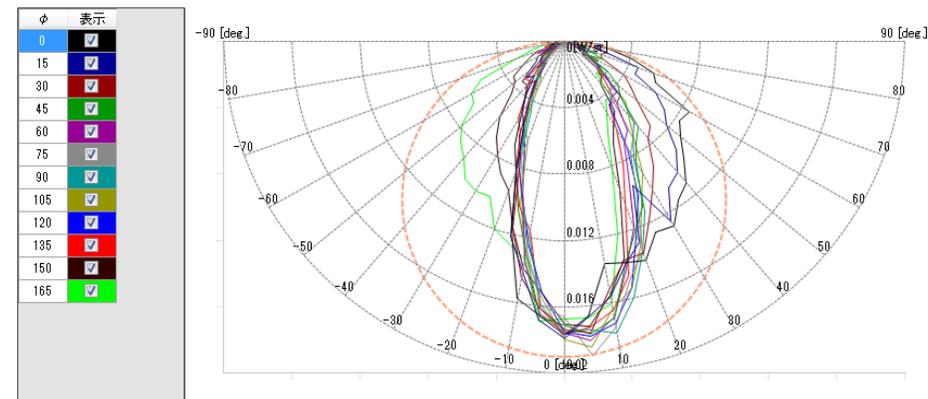
任意の場所、時間の太陽の可視光・赤外光の輝度を表現  
(実測を基にした精緻なシミュレーション)



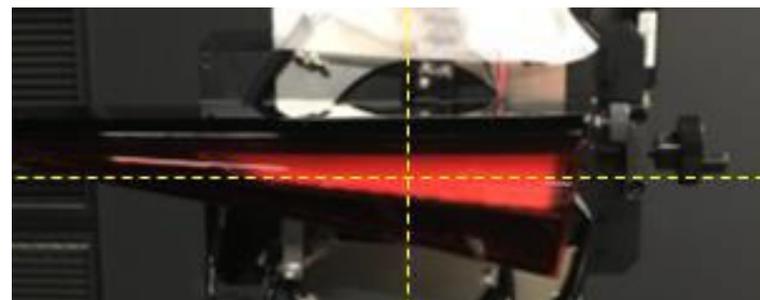
### ランプ特性の計測

車両のヘッドランプやテールランプの配光特性を測定

プリウステールランプの配光特性データ



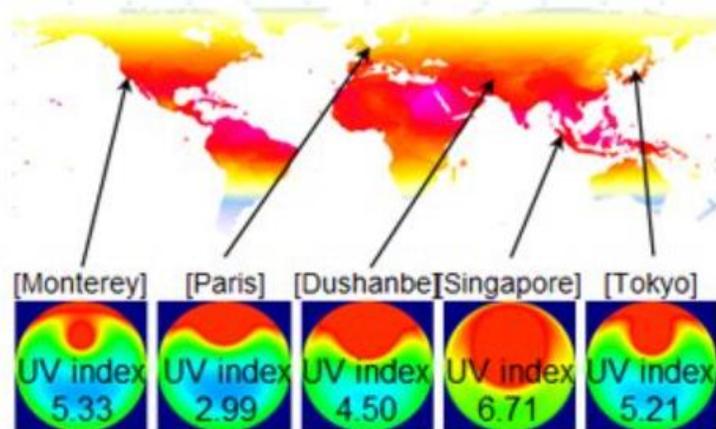
実測したプリウステールランプ



# いつでも、地球上のどこでも、どの方向でも、どの波長でも、高精度の太陽光線のシミュレーションが可能

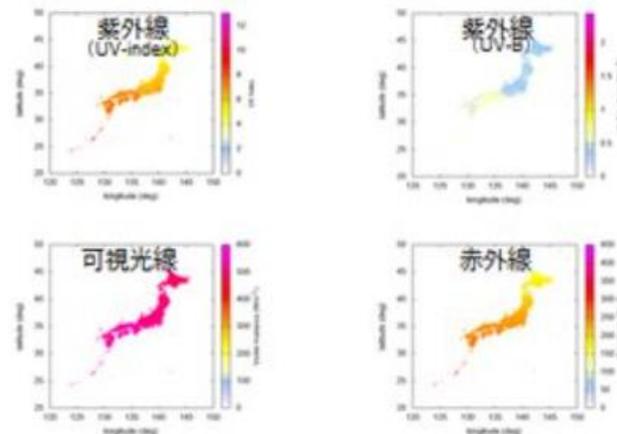
## いつでも地球上のどこでもシミュレーションが可能

日付と時刻、緯度経度で指定した地点をピンポイントに計算可能



## 太陽光線の成分ごとのシミュレーションが可能

紫外線・可視光線・赤外線強度や積算に応じた分析が可能



## 方向を指定してシミュレーションが可能

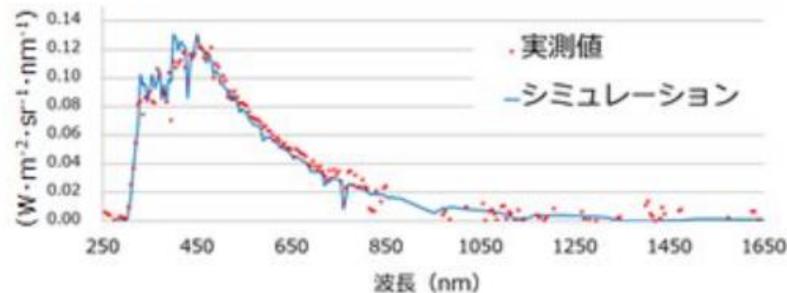
照射方向や方位に応じた照射量の計算が可能



## 高精度なシミュレーションが可能

シミュレーション結果と実測値はほぼ同値

シミュレーションと実測値との比較



# 実際の太陽光の動きをシミュレートにより、実環境と同等の光の再現が可能に

## 天空光シミュレーション

晴れ 07:00 → 17:00



曇り 07:00 → 17:00

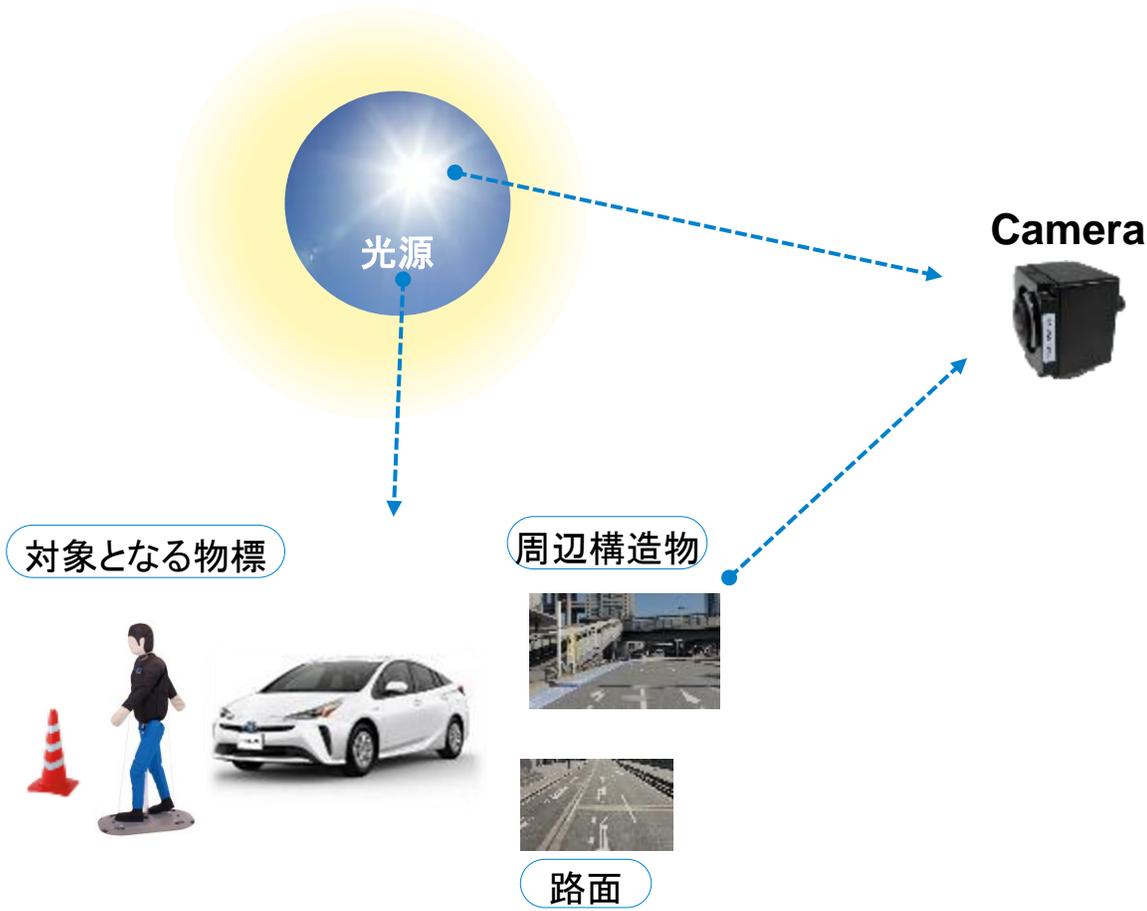


---

1	3Dモデル
2	反射
3	光源
4	伝搬

レイトレーシングにより可視光の伝搬経路算出。求めた経路を元にレンダリング方程式を解くことで、受信光強度を求める。

## カメラの空間伝搬モデル



### カメラ空間モデル 再現のポイント

- 他のセンサ同様にレイトレース法を用いて可視光伝搬を再現する
- 計測した散乱と鏡面の反射率を利用することで強度を再現。
- レンズによる影響も再現する

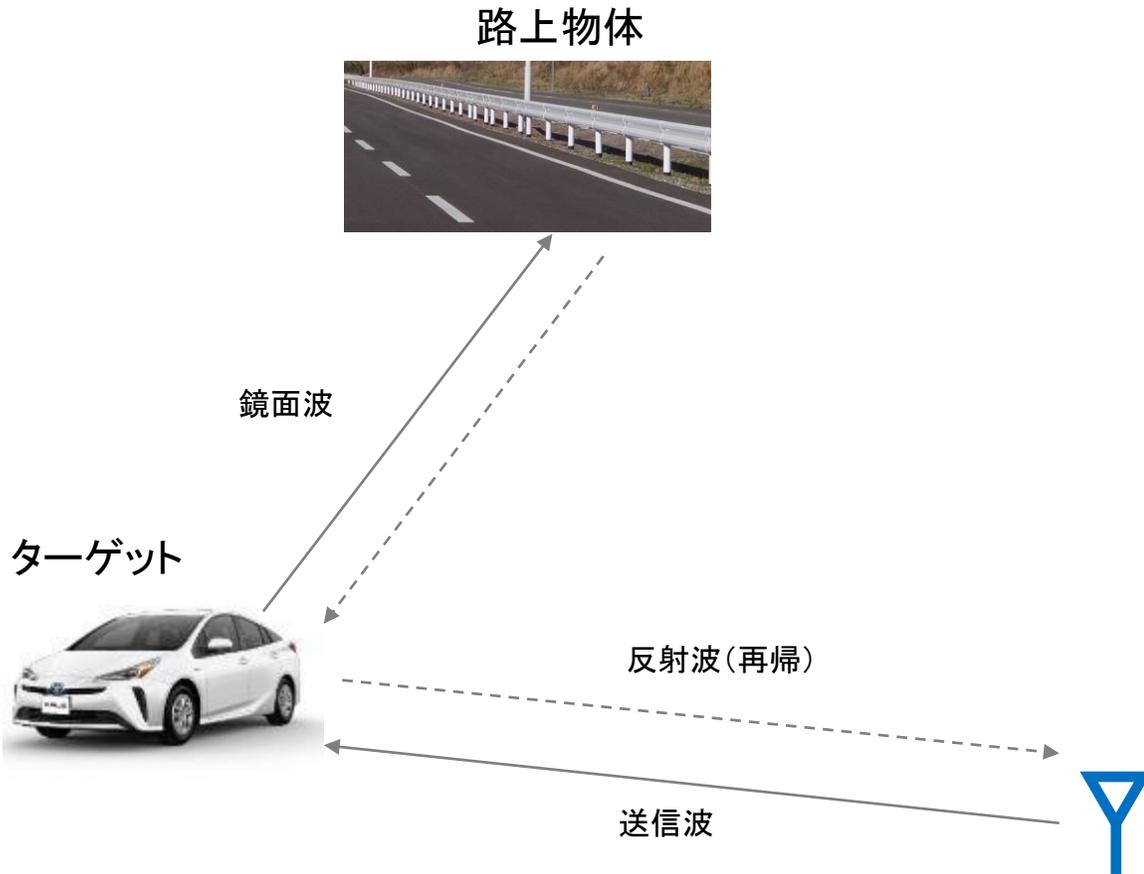
- 可視光の光源、空間伝搬・対象物体上の反射の再現
- レンダリング方程式を用いて、受信光強度の計算を行う。

$$L_o(x, \vec{\omega}_0) = L_e(x, \vec{\omega}_0) + \int_{\mathcal{H}^2} f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_0) L_i(x, \vec{\omega}_i) |\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}| d\vec{\omega}_i$$

$L_o$ : 出射放射輝度  
 $L_i$ : 入射放射輝度  
 $f_r$ : BRDF  
 $\vec{\omega}_0$ : 反射方向  
 $\vec{\omega}_i$ : 入射方向  
 $\vec{n}$ : 法線

レイトレーシングにより赤外光の伝搬経路算出。求めた経路を元にLiDAR方程式を解くことで、受信光強度を求める。

## LiDARの空間伝搬モデル



### LiDAR空間モデル 再現のポイント

- 他のセンサ同様にレイトレース法を用いて赤外光伝搬を再現する
- 計測した再帰と鏡面の反射率を利用することで強度を再現。

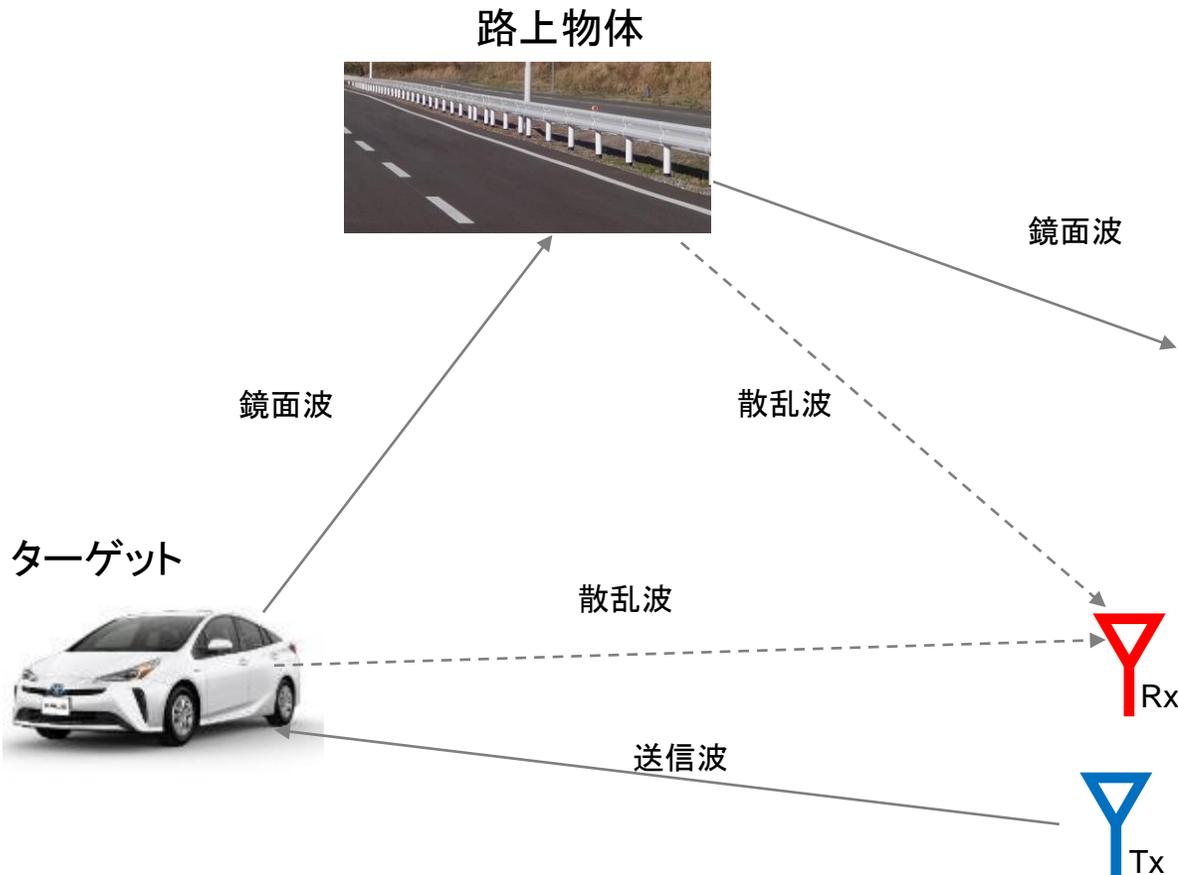
- 赤外光の空間伝搬・対象物体上の反射の再現
- LiDAR方程式を用いて、受信光強度の計算を行う。

$$P_r(R) = \frac{\rho A_{RX}}{\pi R^2} P_t$$

$P_r$ : 受信光強度  
 $P_t$ : 送信光強度  
 $A_{RX}$ : 受光面積  
 $\rho$ : 反射率

レイトレーシングにより電波の伝搬経路算出。求まった経路を元にレーダー方程式を解くことで、受信電波を求める。

## レーダーの空間伝搬モデル



### レーダー空間モデル 再現のポイント

- 他のセンサ同様にレイトレース法を用いて電波伝搬を再現する
- 計測した散乱と鏡面の反射率を利用することで強度を再現。位相回転、偏波回転も計測データを元に再現する
- 車両ホイールや歩行中の人などによるマイクロドップラーも再現する

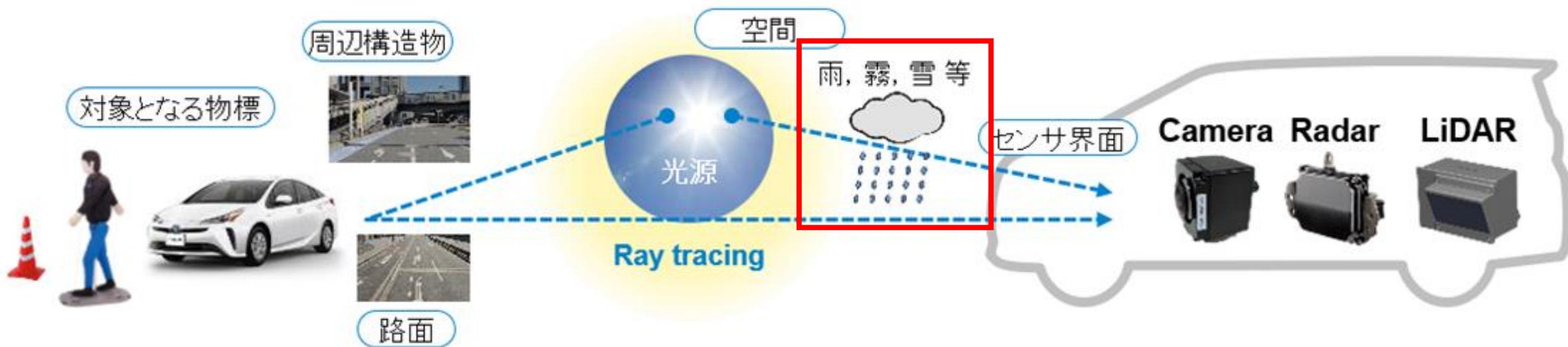
- ミリ波の電波源、空間伝搬・対象物体上の反射の再現
- レーダー方程式を用いて、受信電力の計算を行う。

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

$P_r$ : 受信電力  
 $P_t$ : 送信電力  
 $G_t$ : 送信アンテナ利得  
 $G_r$ : 受信アンテナ利得  
 $\lambda$ : 波長  
 $\sigma$ : RCS値  
 $R$ : 物標とレーダーとの距離

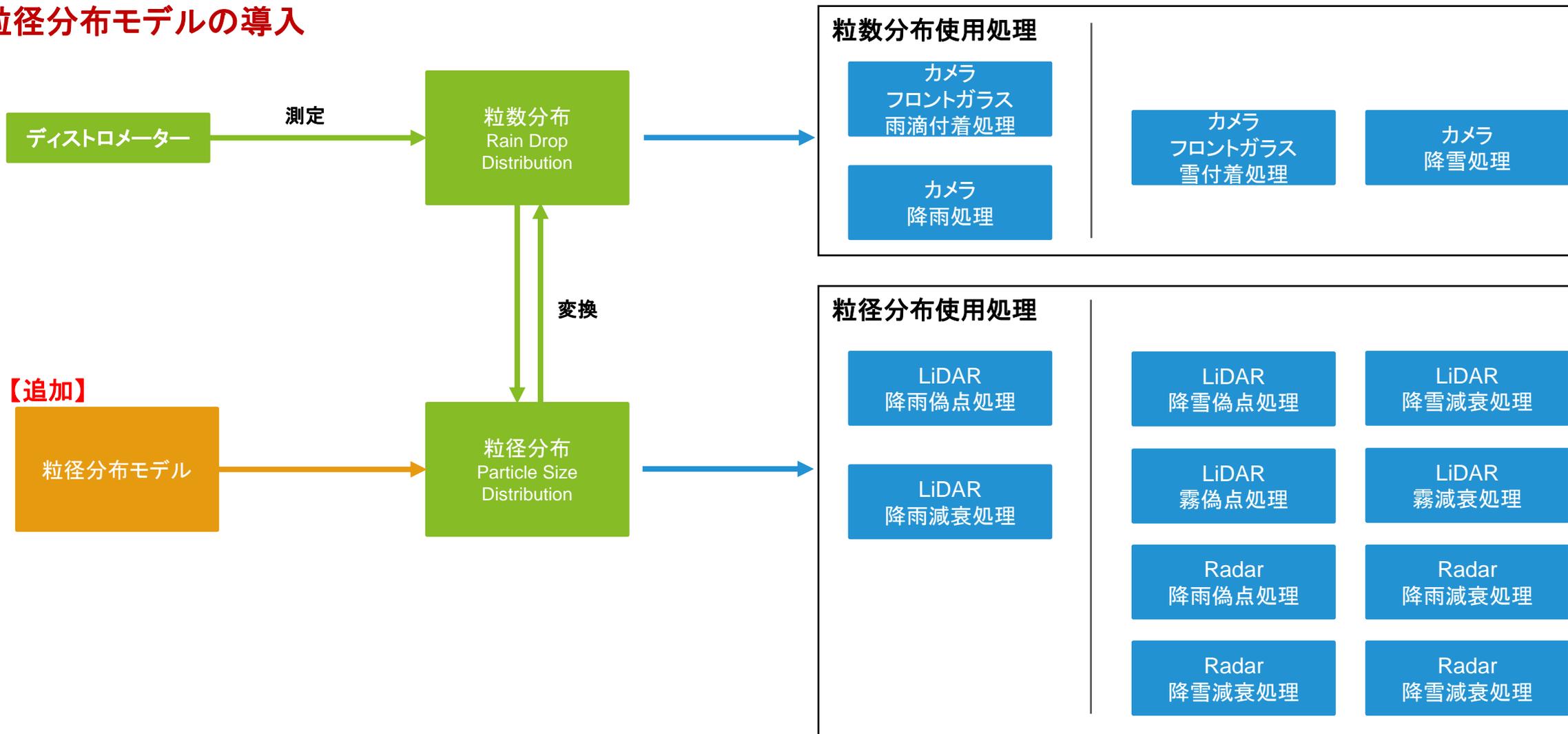
# 精緻な伝搬処理に加えて、雨・霧・雪などの自然現象の再現の取り組んでいる

## 雨・霧・雪の再現



# 降雨実験データのないケースや降雪処理のために、粒径分布モデルを導入

## 粒径分布モデルの導入



# 様々な粒径分布モデルを導入することで、測定データのない降雨量にも対応可能に。

## 粒径分布モデル

ある降水量の環境において、自然界の雨を長期間観測して統計的にモデル化したもの。

### 【降雨】

モデル名	Laws-Parsons	Marshall Palmer	Joss-Drizzle	Joss-Thunderstorm
文献	[1],[2]	[3]	[4]	[4]
式	$N_D = N_0 D^{2.93} e^{-\Lambda D}$ $N_0 = 1.98 * 10^4 R^{-0.384}$ $\Lambda = 5.38 R^{-0.186}$	$N_D = N_0 e^{-\Lambda D}$ $N_0 = 8 * 10^3$ $\Lambda = 4.1 R^{-0.21}$	$N_D = N_0 e^{-\Lambda D}$ $N_0 = 3 * 10^4$ $\Lambda = 5.7 R^{-0.21}$	$N_D = N_0 e^{-\Lambda D}$ $N_0 = 1.4 * 10^3$ $\Lambda = 3.0 R^{-0.21}$

### 【降雪】

モデル名	Gunn Marshall	Sekhon Srivastava
文献	[5]	[6]
式	$N_D = N_0 e^{-\Lambda D}$ $N_0 = 7.6 * 10^3 R^{-0.87}$ $\Lambda = 2.55 R^{-0.48}$	$N_D = N_0 e^{-\Lambda D}$ $N_0 = 5.0 * 10^3 R^{-0.94}$ $\Lambda = 2.29 R^{-0.45}$

### 【霧】

モデル名	Deimendjian
文献	[7]
式	$N_D = \frac{\gamma \rho b^{\frac{\alpha+1}{\gamma}}}{\Gamma\left(\frac{\alpha+1}{\gamma}\right)} \left(\frac{D}{2}\right)^\alpha e^{-b\left(\frac{D}{2}\right)^\gamma}$

[1] R. G. Medhurst, "Rainfall attenuation of centimeter waves: Comparison of theory and measurement," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-13, pp. 550-564, July 1965.

[2] J. O. Laws and D. A. Parsons, "The relation of raindrop-size to intensity," Trans. Amer. Geophys. Union, vol. 24, pp. 452-460, 1943

[3] J. S. Marshall and W. McK. Palmer, "The distribution of raindrops with size," J. Meteor., vol. 5, pp. 165-166, Aug. 1948.

[4] J. Joss, J. C. Thams, and A. Waldvogel, "The variation of raindrop size distributions at Locarno," in Proc. Int. Conf. Cloud Physics, pp. 369-373, 1968.

[5] Gunn, K. L. S. and Marshall, J. S.: The Distribution with Size of Aggregate Snowflakes, J. Meteorol., 15, 453-455, 1957.

[6] Sekhon, R. S. and Srivastava, R. C.: Snow size spectra and radar reflectivity, J. Meteorol., 27(2), 299-307, 1970.

[7] Isaac, K. I., McArthur, B., and Korevaar, E.: Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications, Proc. SPIE Vol. 4214, Optical Wireless Communications III, pp. 26-37, 2001.

## 【カメラ】降雨とフロントガラス面降雨付着の再現

### カメラ降雨処理実行結果例



## 【カメラ】霧の再現

### カメラ霧処理実行結果例



## 【カメラ】降雪とフロントガラス面降雪付着の再現

### カメラ降雪処理実行結果例

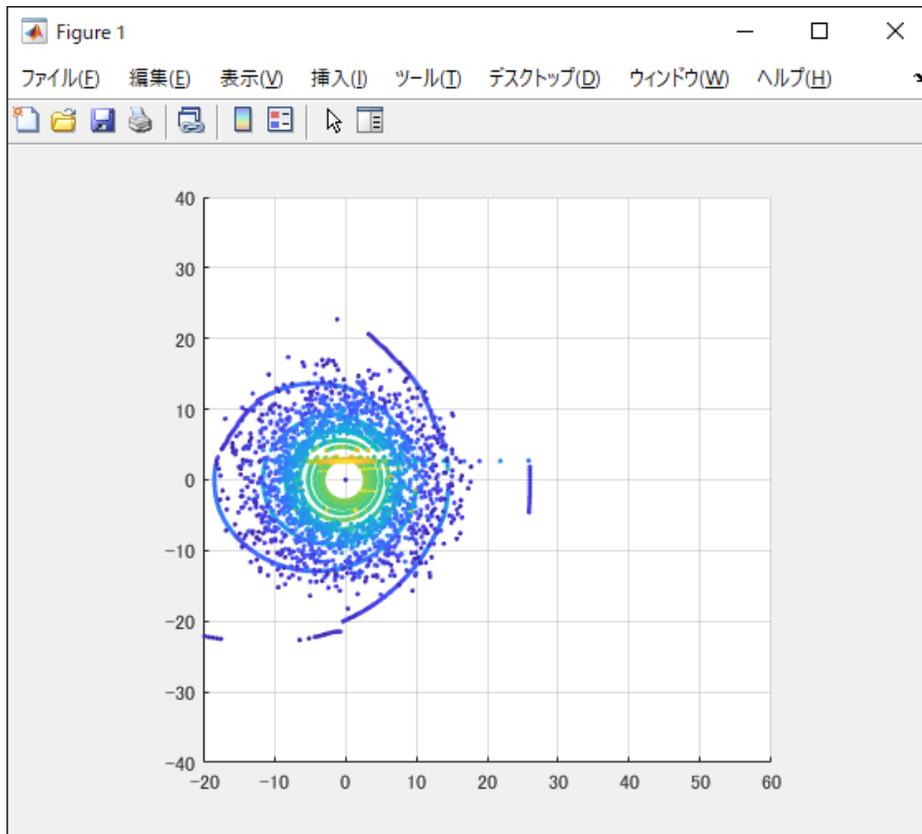


# 【LiDAR】降雪偽点と降雪減衰の再現

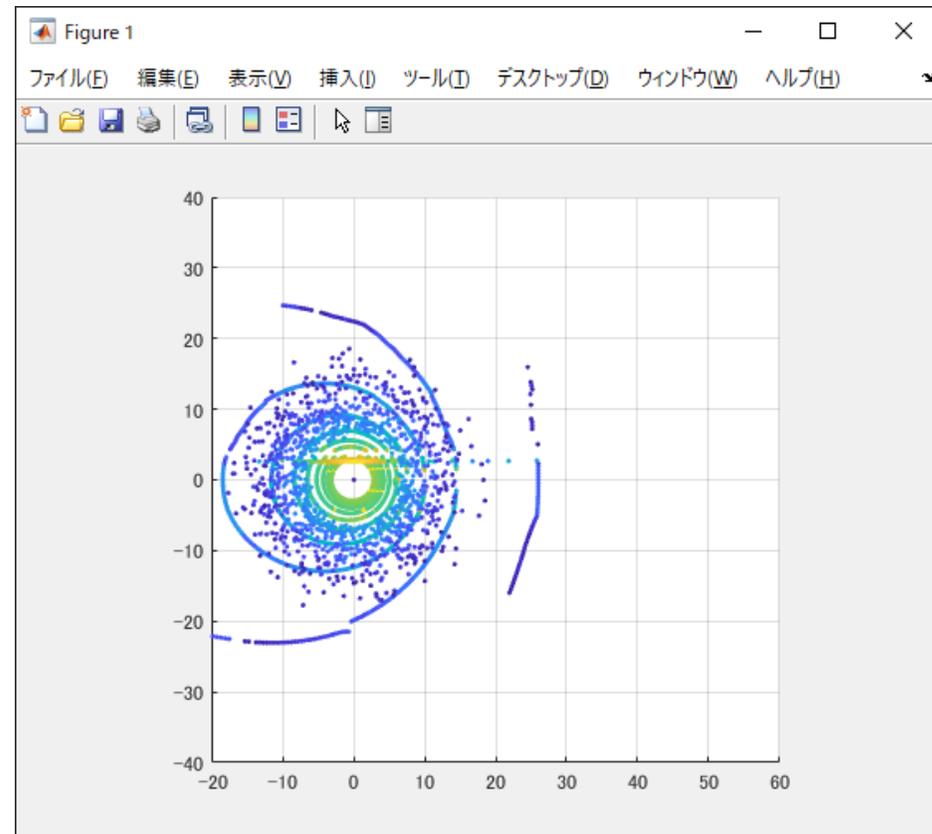
## LiDAR降雪処理実行結果例

2種類の粒径分布で、降雪偽点が発生することを確認。  
一致性検証は未実施のため、検証実験の実施を検討中。

Gunn Marshall



Sekhon Srivastava



# 【LiDAR】霧偽点と霧減衰の再現

## 霧タイプと実行例

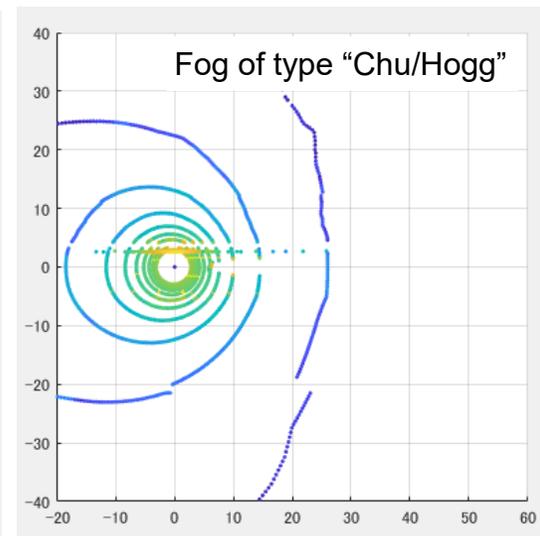
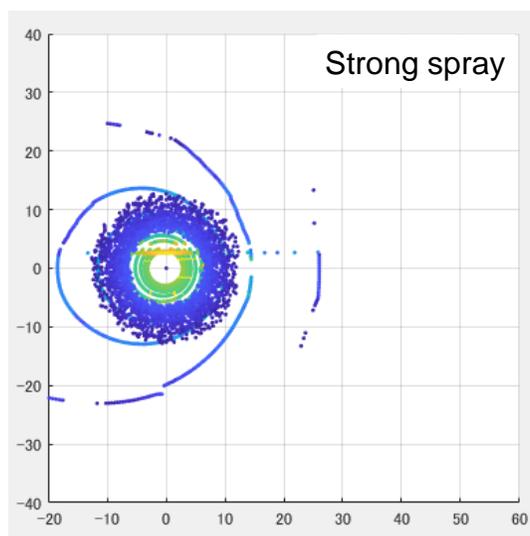
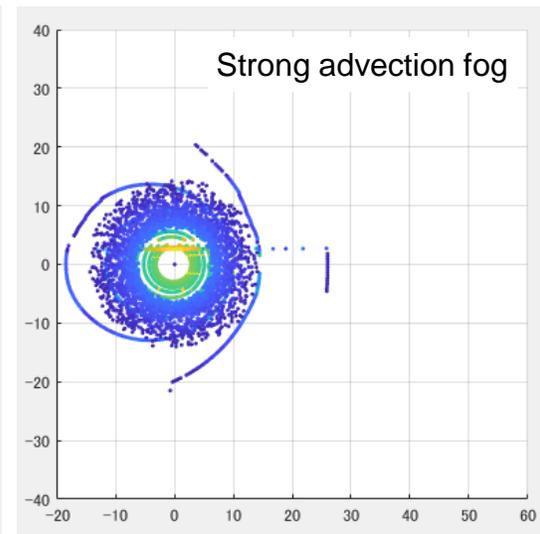
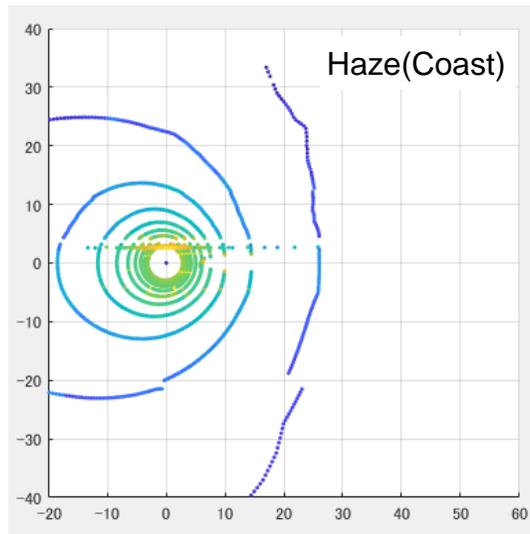
### 霧タイプ

Weather condition	$\rho$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$\alpha$	$\gamma$	$r_C$ [ $\mu\text{m}$ ]
Haze (coast)	100	1	0.5	0.05
Haze (continental)	100	2	0.5	0.07
Strong advection fog	20	3	1.0	10.00
Moderate advection fog	20	3	1.0	8.00
Strong spray	100	6	1.0	4.00
Moderate spray	100	6	1.0	2.00
Fog of type “Chu/Hogg”	20	2	0.5	1.00

数種類の霧のタイプを実装。

霧の密度や粒子の大きさによって、偽点が発生したりしなかったりすことを確認。

一致性検証は未実施のため、検証実験の実施を検討中。

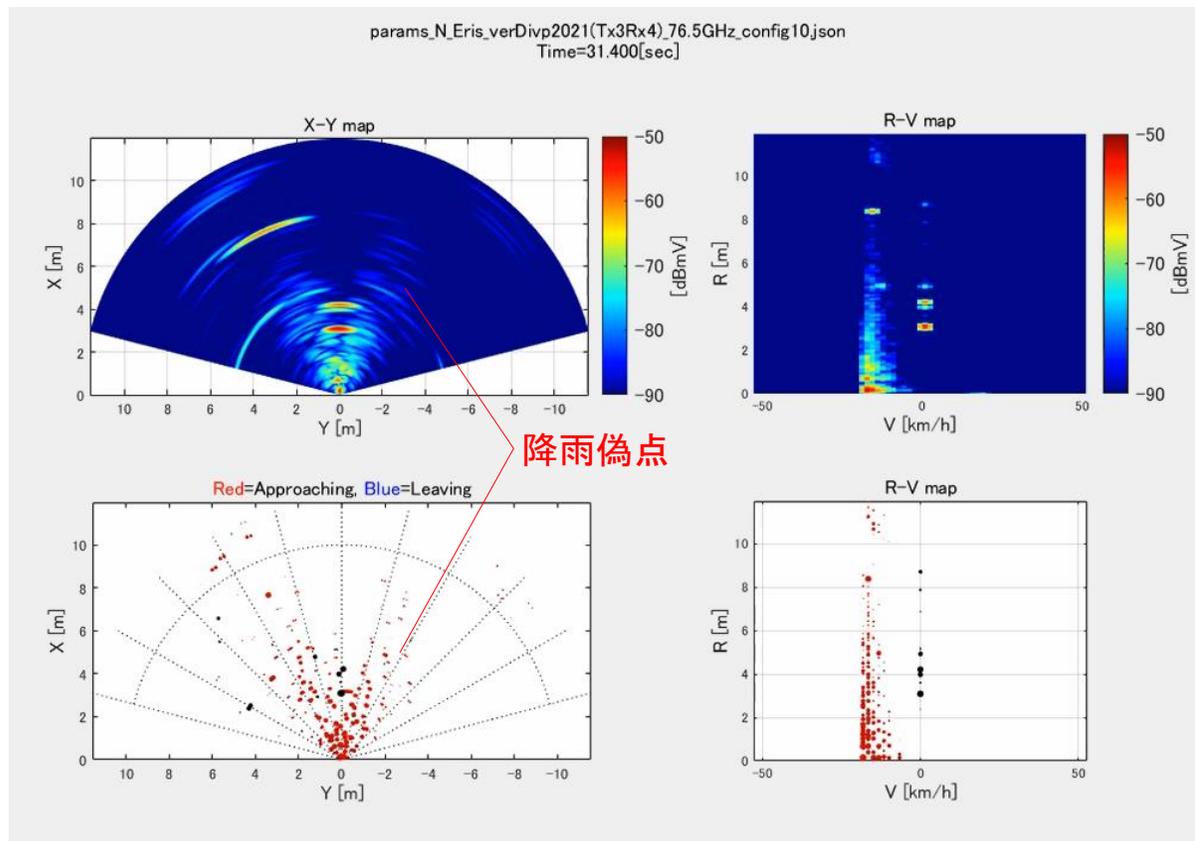


# 【Radar】降雨偽点と降雨減衰の再現

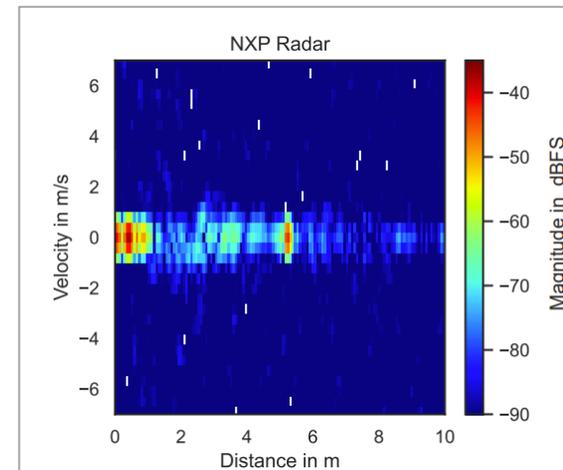
## Radar降雨処理実行結果例

実測と類似した結果が得られることを確認。

### シミュレーション結果



### 実測結果

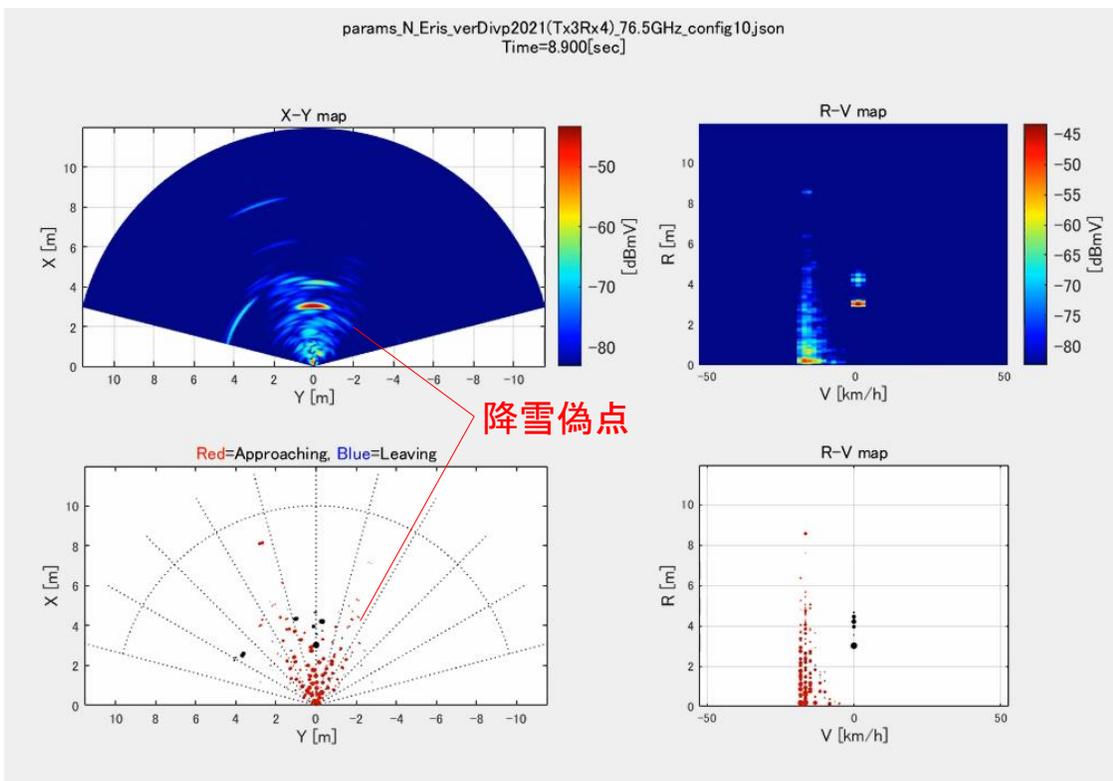


# 【Radar】降雪偽点と降雪減衰の再現

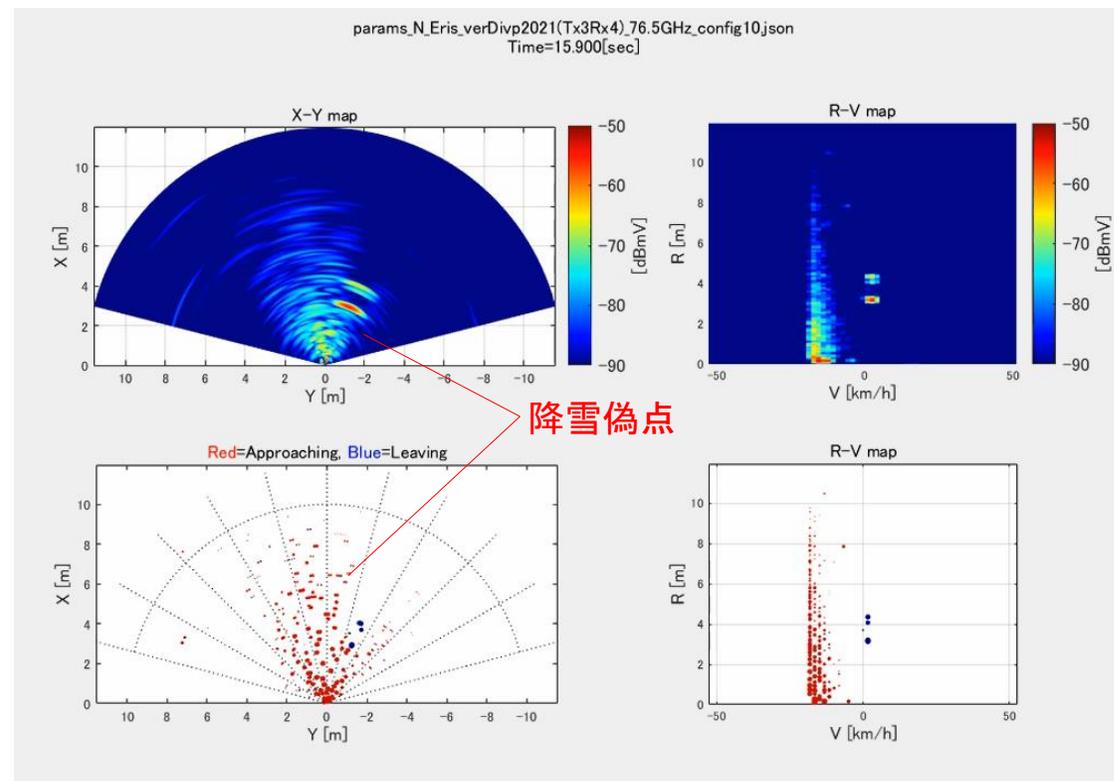
## Radar降雪処理実行結果例

2種類の粒径分布で、降雪偽点が発生することを確認。  
一貫性検証は未実施のため、検証実験の実施を検討中。

Gunn Marshall



Sekhon Srivastava



**END**

*Tokyo Odaiba → Virtual Community Group*

