

DIVP-PFのRadar空間モデル

発表者プロフィール



- 池田正和
- masakazu.ikedaj5g@soken-labs.co.jp

- 当社は、計測・可視化技術によって、デンソー・トヨタ自動車の製品開発・研究事業を行っています
- DIVPでは得意とする計測技術を用いて、主に実環境のデータ計測を担当しました

SOKEN

経歴

- 2013年 (株)デンソーに転社、(株)SOKEN出向
車載電波応用製品(GPS,V2X,Radar等)の開発に従事
- 2019年 SIP第二期/DIVPプロジェクトに参画
反射率計測・モデル化、実車データ計測を担当
- 2023年 SIP第二期活動終了
DIVPを用いた次世代レーダを開発中

背景 / 目的

- DIVPは実走行試験を代替可能な、実機と一致性の高いシミュレーションを目指している。
- 実機と高い一致性を実現するために、DIVPで採用している「実測に基づいたミリ波レーダの反射特性モデル」について紹介する

骨子

- レーダ方程式について
- ミリ波レーダの電波伝搬について
- DIVPの反射・散乱モデル
- DIVPの反射体モデル
- DIVPの散乱体モデル
- DIVPでの散乱点の再現方法について
- まとめと今後の展望

SOKEN

DIVP-PFのRadar空間モデル

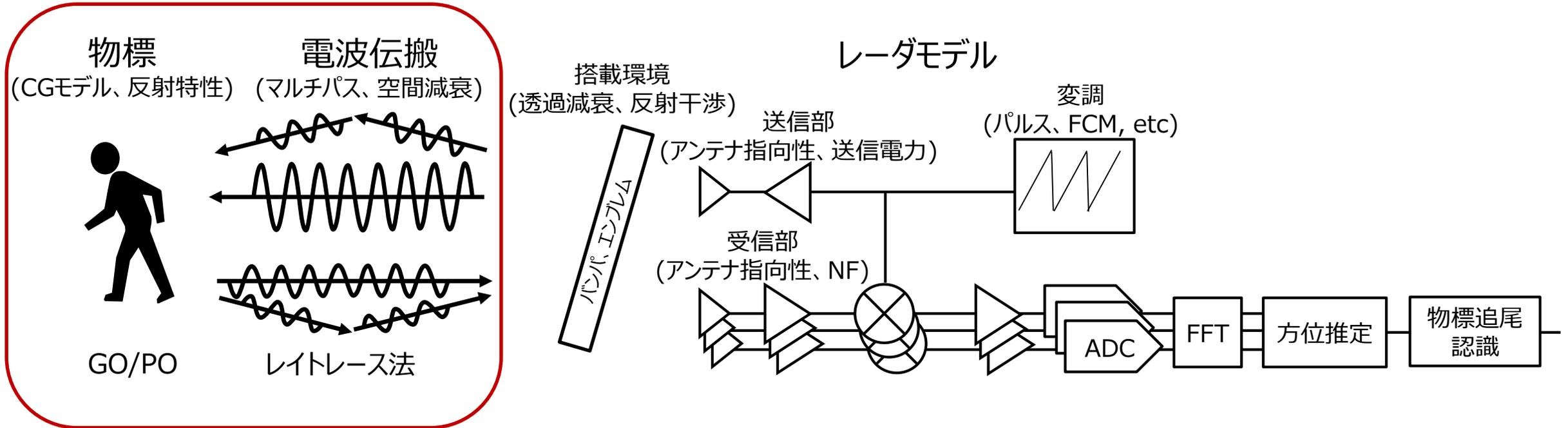
池田正和

株式会社 SOKEN

2024年7月25日

本発表のフォーカスポイント

CONFIDENTIAL
関係者外秘



DIVPにおける、ミリ波レーダの電波伝搬及び物標での反射・散乱について説明する

Agenda

1. レーダ方程式について
2. ミリ波レーダの電波伝搬について
3. DIVPの反射・散乱モデル
4. DIVPの反射体モデル
5. DIVPの散乱体モデル
6. DIVPでの散乱点の再現方法について
7. まとめと今後の展望

1

レーダ方程式について

レーダ方程式

CONFIDENTIAL

関係者外秘

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

*位相項は省略

受信電力 : P_r 知りたい値

送信電力 : P_t
受信アンテナ利得 : G_t
受信アンテナ利得 : G_r
波長 : λ

既知
(ハードウェア性能)

伝搬距離 : r
レーダ断面積 : σ

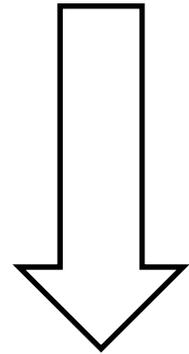
未知

RCS : Radar Cross Section

ミリ波レーダシミュレーションでは、受信電力を求めたい
未知変数は、伝搬距離とレーダ断面積

レーダ方程式

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



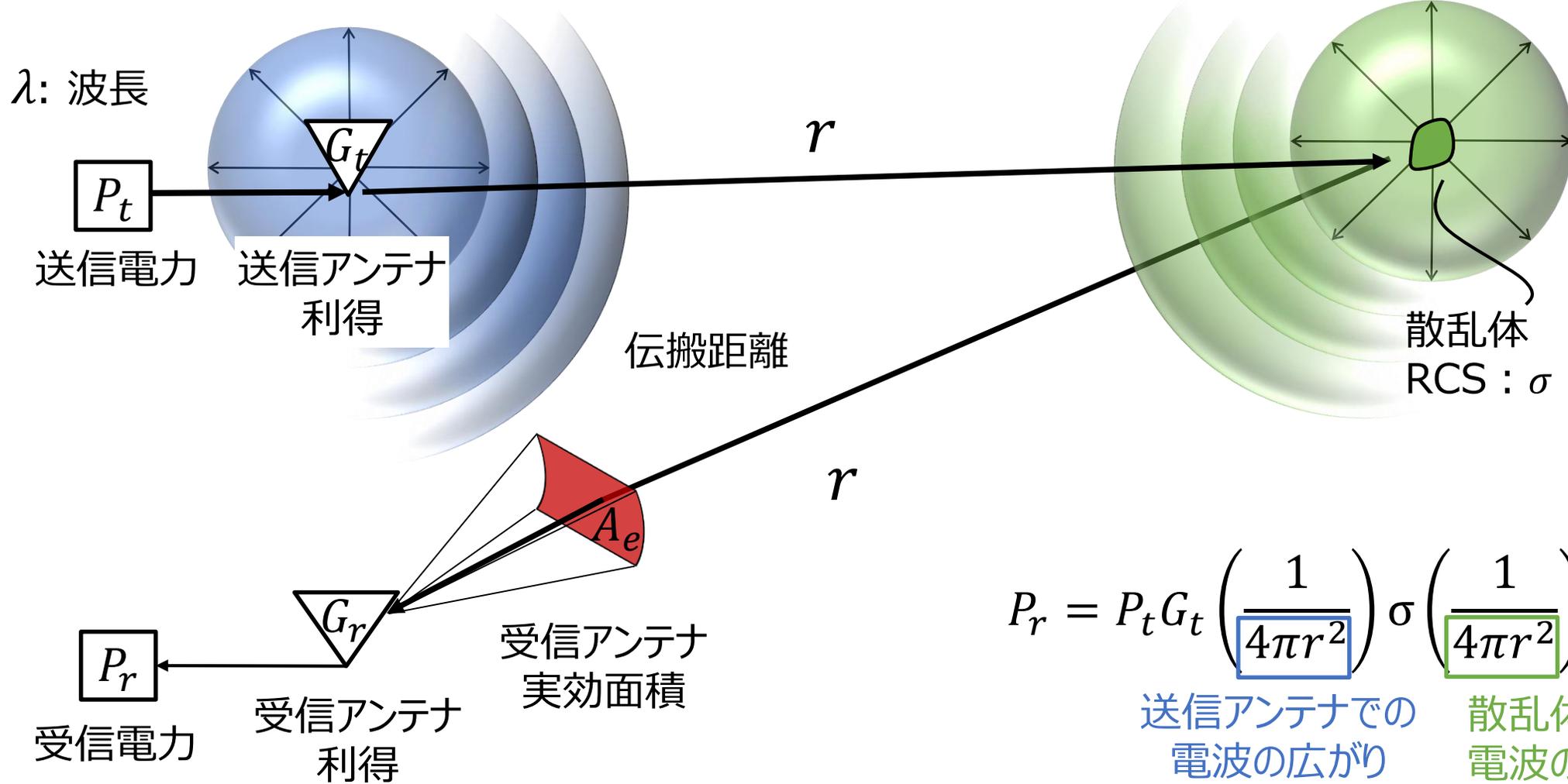
アンテナ実効面積 : $A_e = \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \right)$

$$P_r = P_t G_t \left(\frac{1}{4\pi r^2} \right) \sigma \left(\frac{1}{4\pi r^2} \right) A_e$$

球の表面積 : $s = 4\pi r^2$

現象を理解しやすいように、レーダ方程式を変形
電波が球状に広がるため、表面積の増加に従って、受信電力が減少する関係式になっている

レーダ方程式(図示化)



$$P_r = P_t G_t \left(\frac{1}{4\pi r^2} \right) \sigma \left(\frac{1}{4\pi r^2} \right) A_e$$

送信アンテナでの電波の広がり 散乱体での電波の広がり

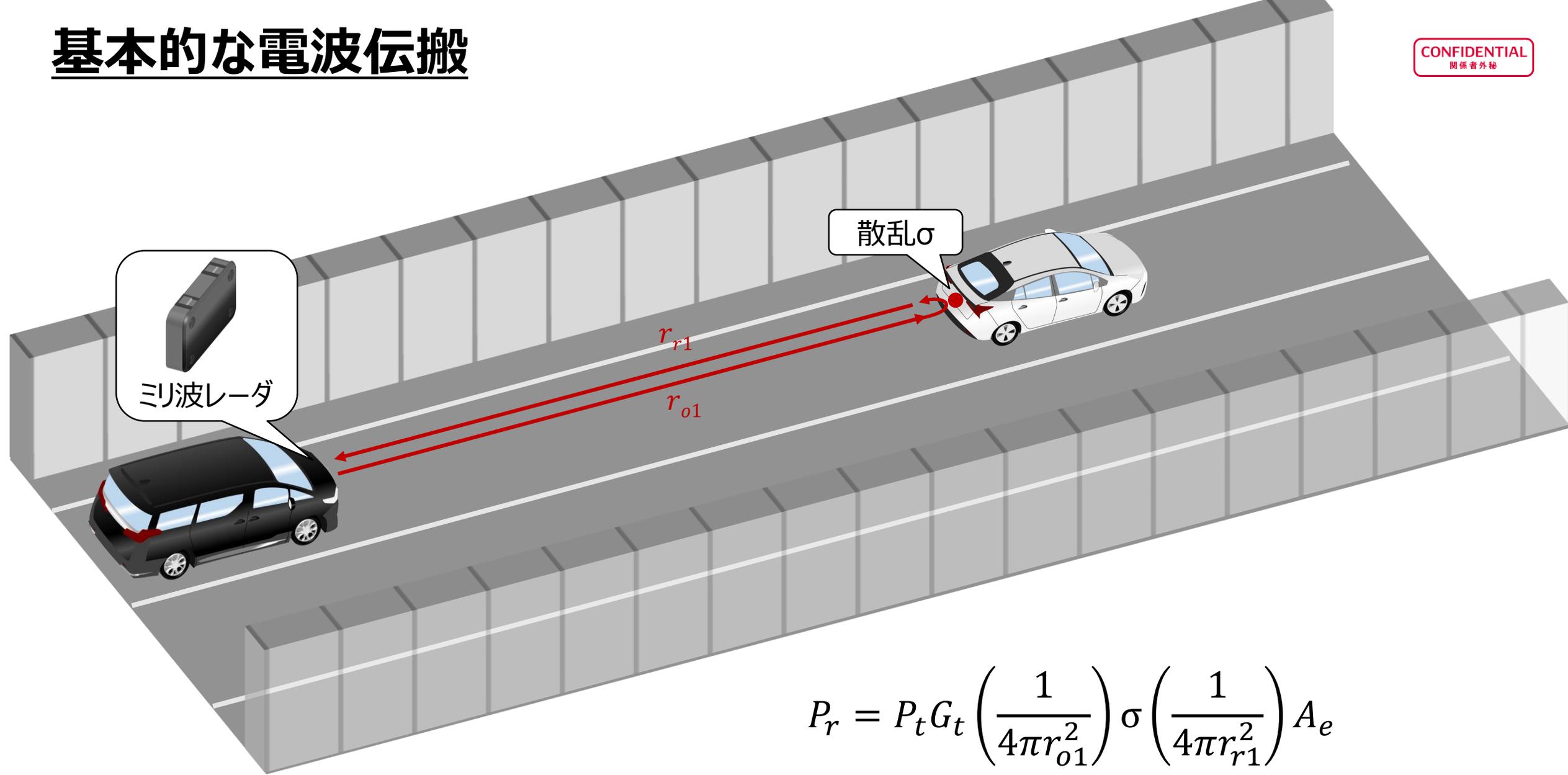
2

ミリ波レーダの電波伝搬について

基本的な電波伝搬

CONFIDENTIAL

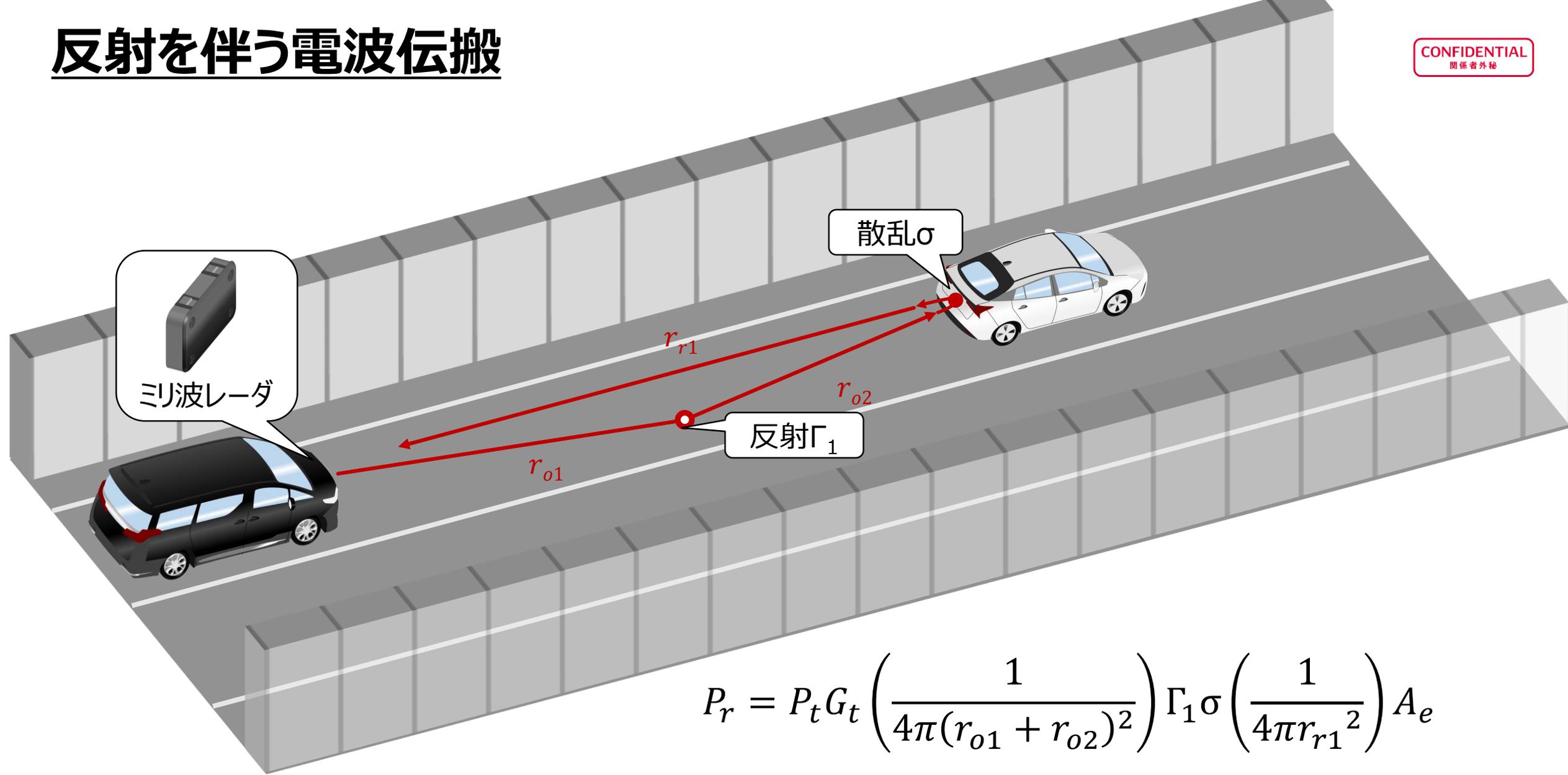
関係者外秘



$$P_r = P_t G_t \left(\frac{1}{4\pi r_{o1}^2} \right) \sigma \left(\frac{1}{4\pi r_{r1}^2} \right) A_e$$

反射を伴う電波伝搬

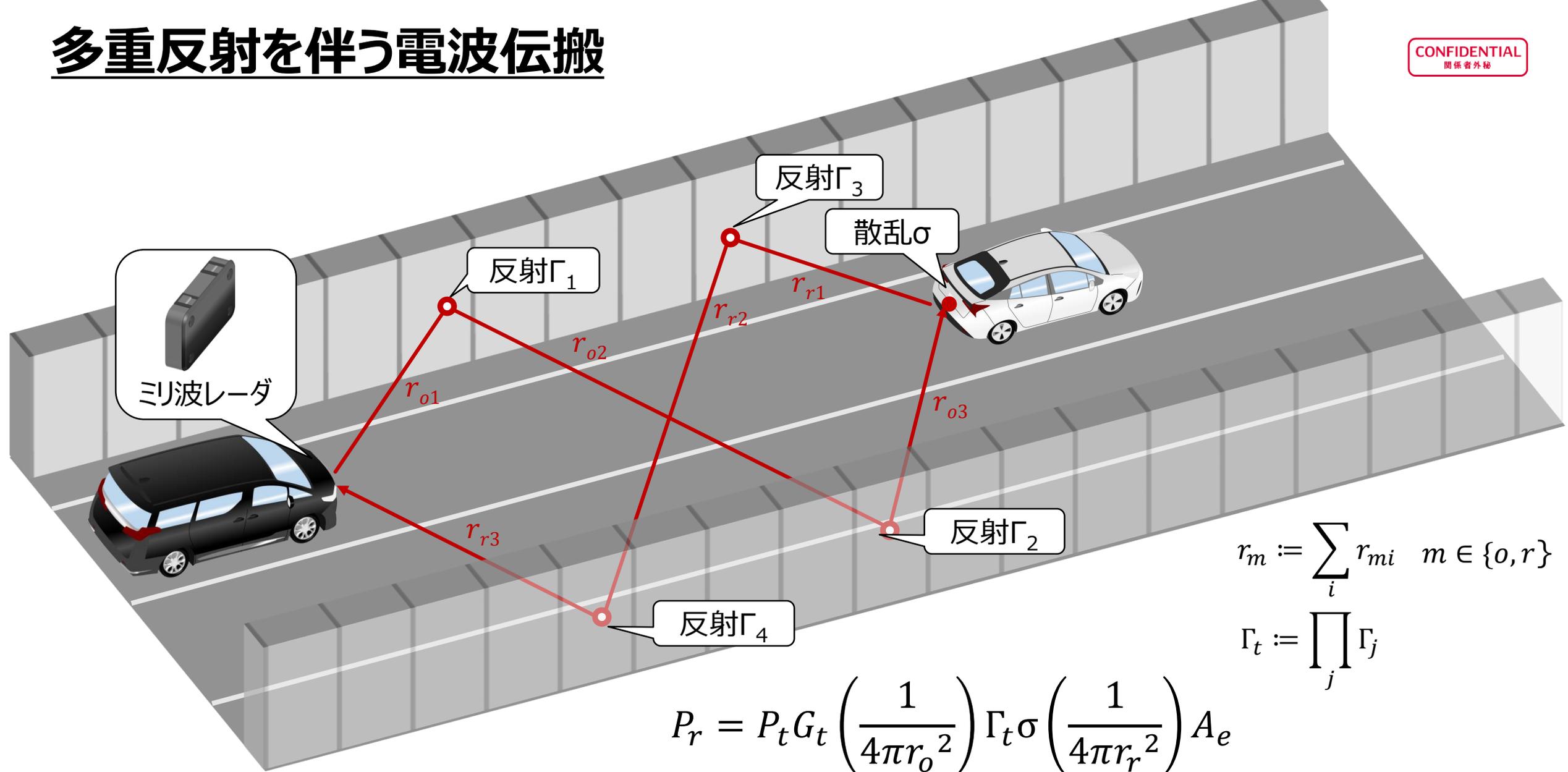
CONFIDENTIAL
関係者外秘



$$P_r = P_t G_t \left(\frac{1}{4\pi(r_{o1} + r_{o2})^2} \right) \Gamma_1 \sigma \left(\frac{1}{4\pi r_{r1}^2} \right) A_e$$

壁や路面などでは反射率Γによる鏡面反射が生じる
反射では電波が球状散乱しないため、伝搬距離は加算される

多重反射を伴う電波伝搬



$$r_m := \sum_i r_{mi} \quad m \in \{o, r\}$$

$$\Gamma_t := \prod_j \Gamma_j$$

$$P_r = P_t G_t \left(\frac{1}{4\pi r_o^2} \right) \Gamma_t \sigma \left(\frac{1}{4\pi r_r^2} \right) A_e$$

ミリ波レーダの電波伝搬のまとめ

CONFIDENTIAL

関係者外秘

$$P_r = P_t G_t \left(\frac{1}{4\pi r_o^2} \right) \Gamma_t \sigma \left(\frac{1}{4\pi r_r^2} \right) A_e$$

$$r_m := \sum_i r_{mi} \quad m \in \{o, r\}$$
$$\Gamma_t := \prod_j \Gamma_j$$

伝搬距離 r はレイトレースシミュレーションによって算出する
詳細は第一回DIVP技術セミナー「DIVP 空間伝搬モデル」を参照

ミリ波レーダシミュレーションには反射率 Γ 、RCS： σ が必要

3

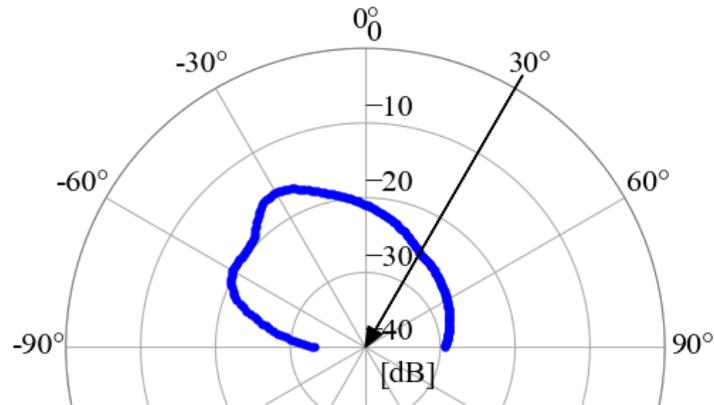
DIVPの反射・散乱モデル

DIVPの3種類の反射モデル

CONFIDENTIAL
関係者外秘

反射体モデル

大きい物標に使用(ビル、路面etc)

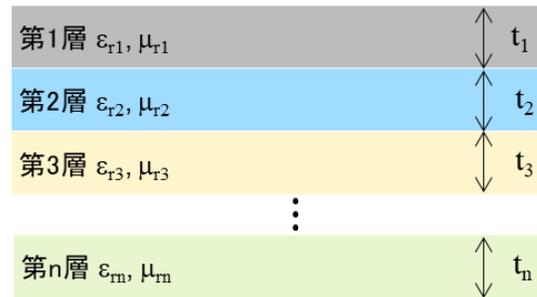


反射率の入射角・出射角テーブル
(偏波特性・位相を含む)

散乱体モデル

小さい物標に使用(車、人etc)

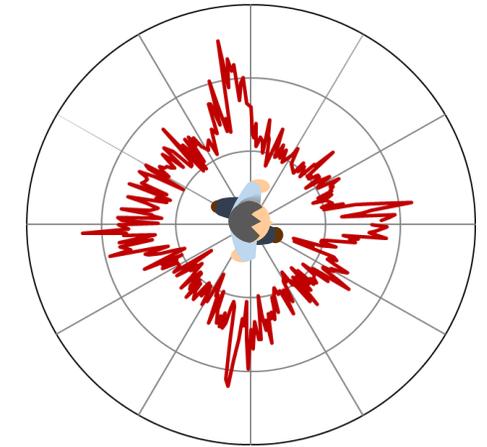
PO(Physical Optics)近似



反射率の鏡面反射率から
Transfer Matrix Methodで推定

材質の実効誘電率・透磁率

Bistatic RCS



事前計測・解析結果した
RCSの入射角・出射角テーブル

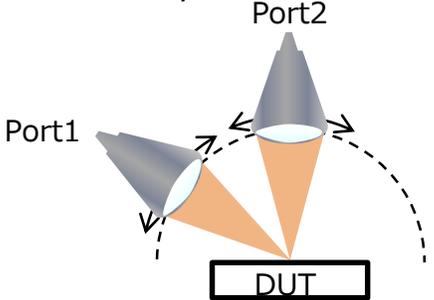
DIVPでは実測に基づいたミリ波レーダ用反射率・RCSデータベースを提供
反射ターゲット・用途に合わせて、3種類の反射モデルを用意

4

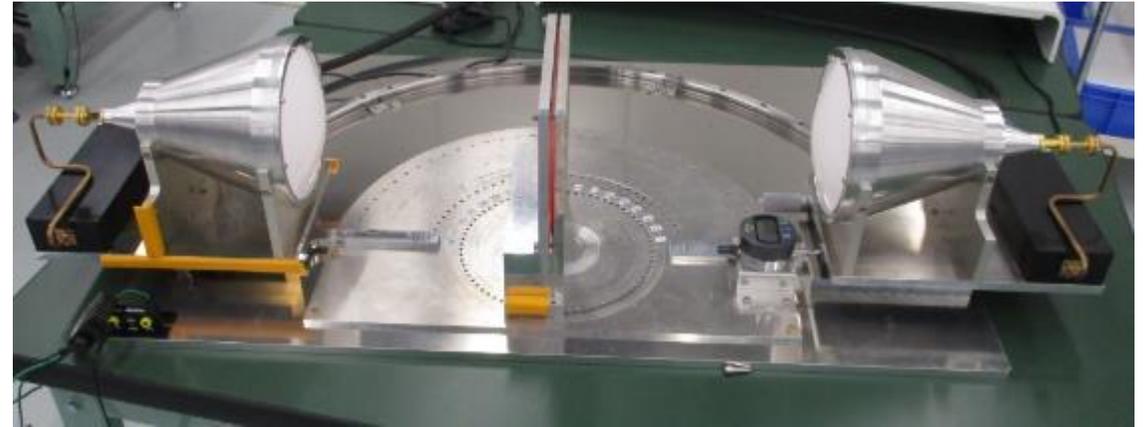
DIVPの反射体モデル

ミリ波反射率測定系

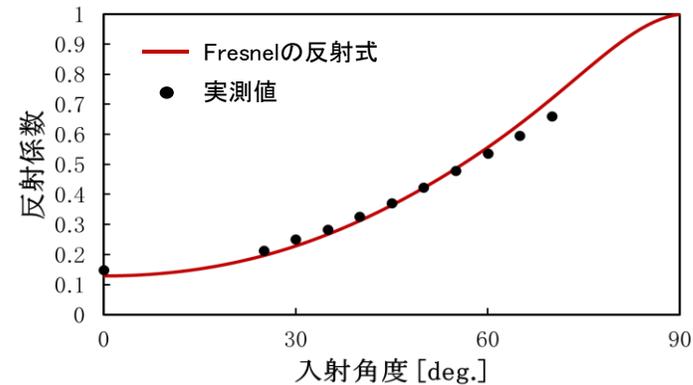
CONFIDENTIAL
関係者外秘

測定条件	<ul style="list-style-type: none">■ 測定周波数 : 75-82GHz 0.1GHz Step■ 測定角度 : 送信アンテナ 0度~75度 5度分解能■ 受信アンテナ 0度~±75度 5度分解能■ アンテナ間角度 >=45度
再帰反射	<ul style="list-style-type: none">■ ポート1での入射波/反射波比から再帰反射を計測 
測定手法	<ul style="list-style-type: none">■ ポート1から入射し、ポート2で受信することで拡散反射及び拡散透過特性を計測
拡散反射 拡散透過	

測定系



測定結果



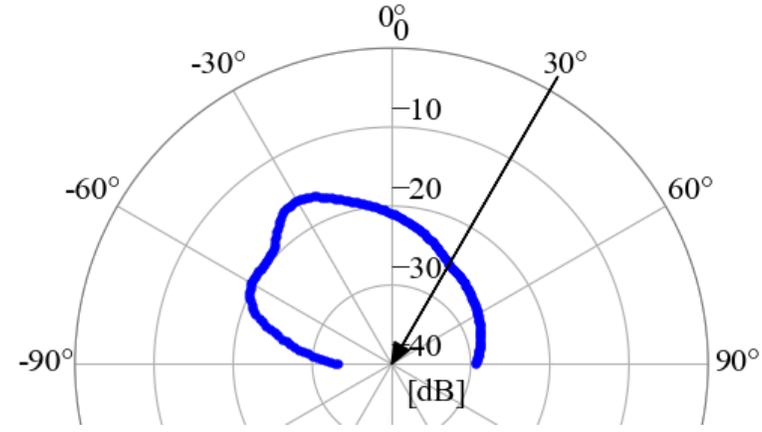
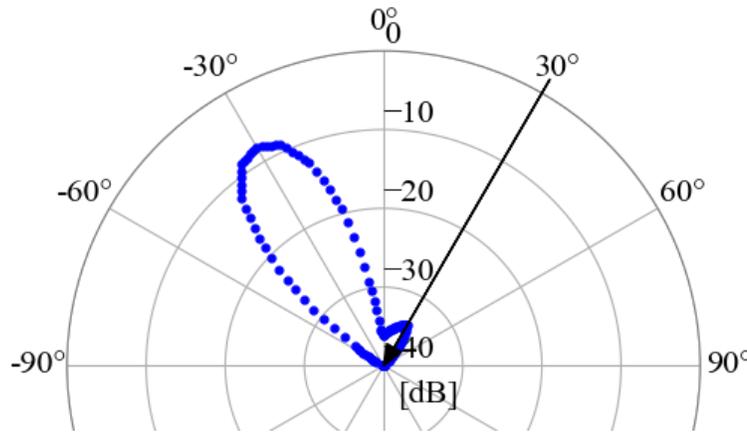
理論式(フレネル反射式)
と実測値との差は
0.5dB以下

ミリ波反射率の実測結果例

一般道路用
非透水性アスファルト



高速道路用
透水性アスファルト



表面が粗い路面では、鏡面反射率が低下し、拡散反射が広がっていることが分かる

ミリ波反射率の誘電率推定結果

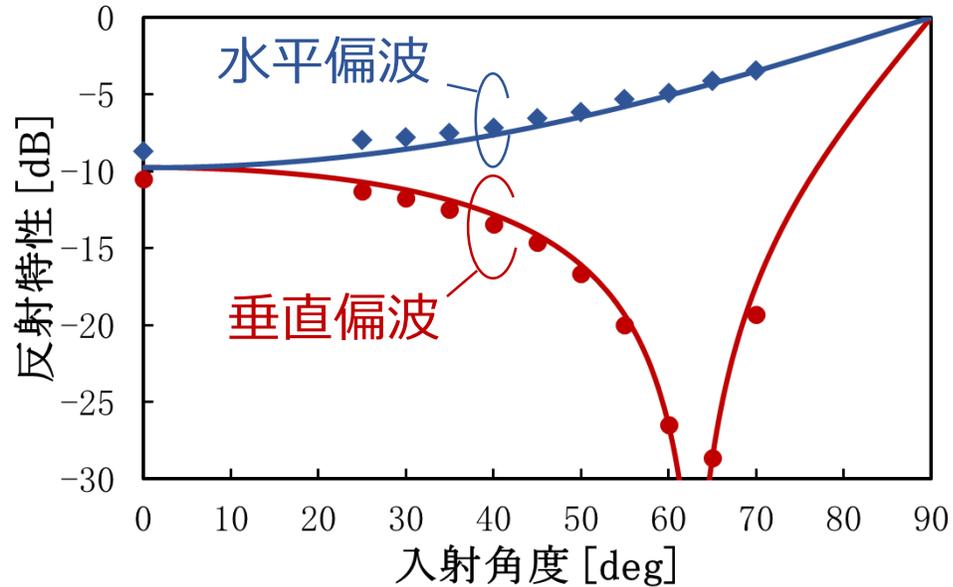
一般道路用
非透水性アスファルト



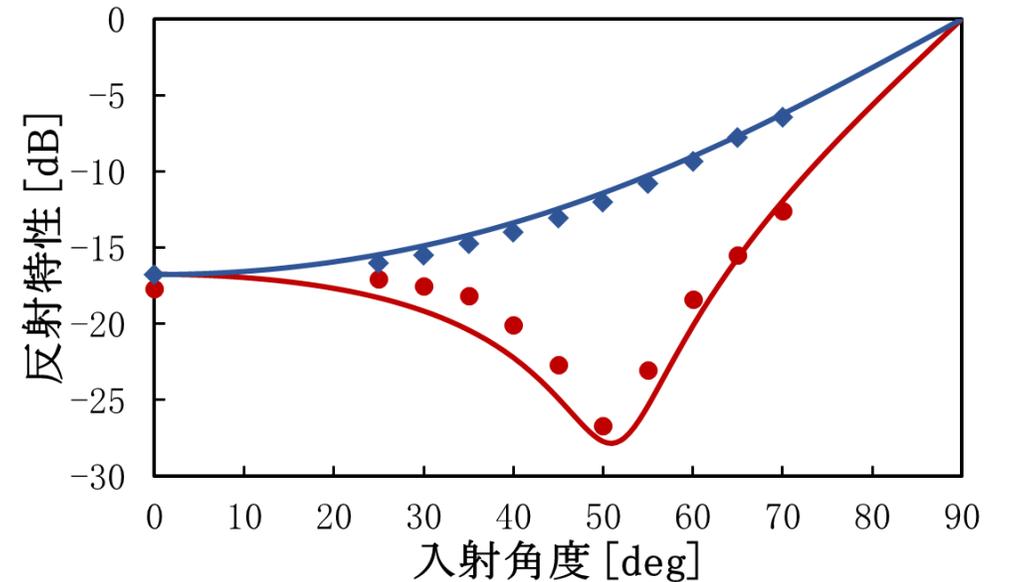
高速道路用
透水性アスファルト



●●● } 実測結果
◆◆◆ }
— } 推定結果



$$\epsilon_r = 3.8 + j0.33$$



$$\epsilon_r = 1.4 + j0.5$$

表面粗さの影響は、実効誘電率として表現

5

DIVPの散乱体モデル

DIVPでのRCSの計算方法

$$\text{Radar Cross Section: } \sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2}$$

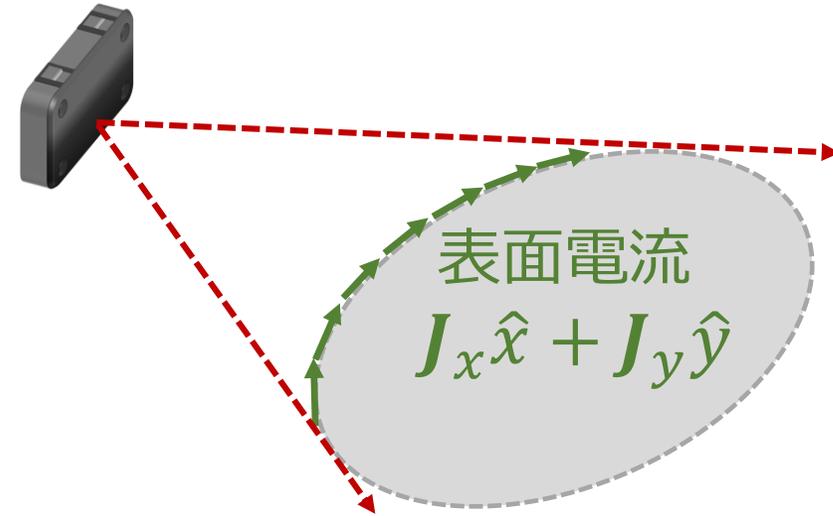
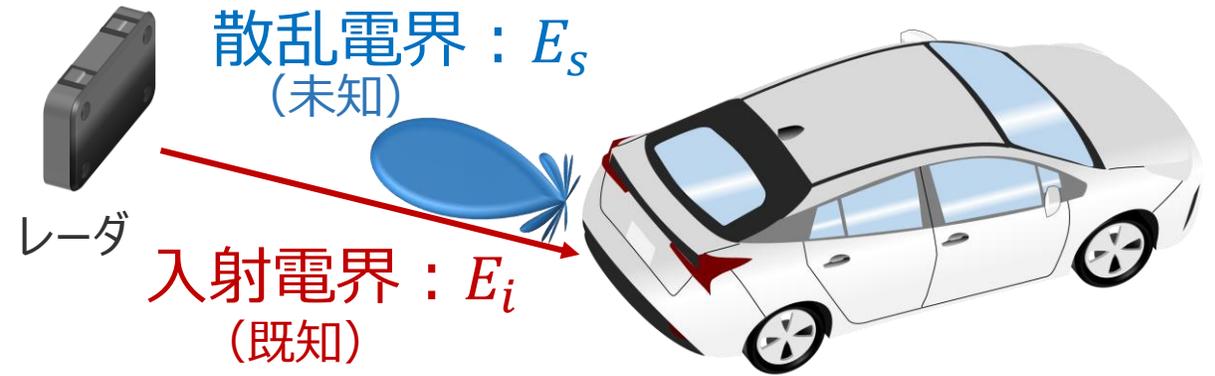
■ PO(Physical Optics)近似式

$$E_s = \frac{-jkZ_0}{4\pi r} e^{-jkr} \int_S (J_x \hat{x} + J_y \hat{y}) e^{jkr \cdot \hat{r}'} dS$$

$$J_x = (-E_{i\theta} \cos\phi \Gamma_{\parallel} + E_{i\phi} \sin\phi \Gamma_{\perp}) \cos\theta / Z_0$$

$$J_y = (-E_{i\theta} \sin\phi \Gamma_{\parallel} - E_{i\phi} \cos\phi \Gamma_{\perp}) \cos\theta / Z_0$$

計測反射率



散乱体のRCSはPO近似によって算出している
PO近似では反射率から算出した表面電流を3Dモデルのポリゴンを積分してRCSを求める

DIVPでのRCS計算例

CONFIDENTIAL

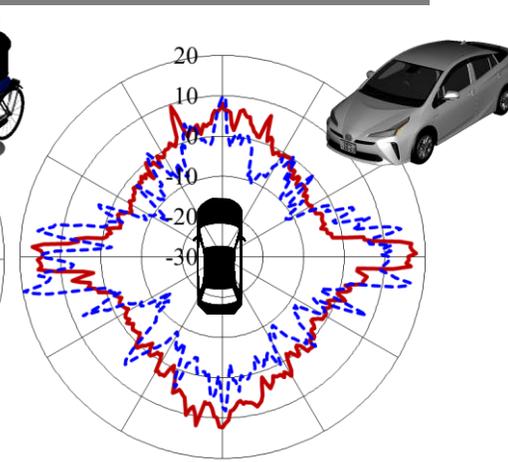
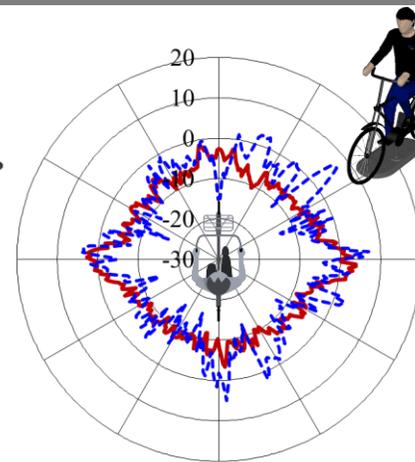
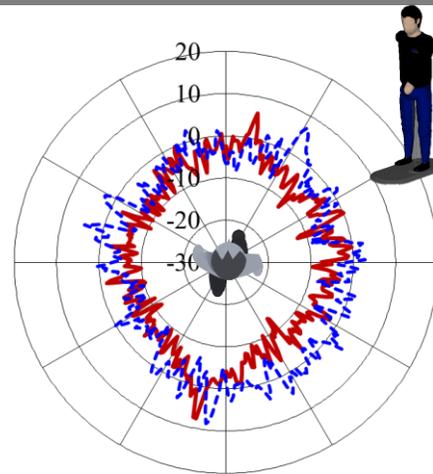
関係者外秘

Test environment



Test Results

— Exp
- - - - DIVP
(PO近似)



面内平均
[dBsm]

NCAP Doll
-5.3 -2.3

NCAP Bicycle
-6.2 -5.3

Prius
1.59 -1.0

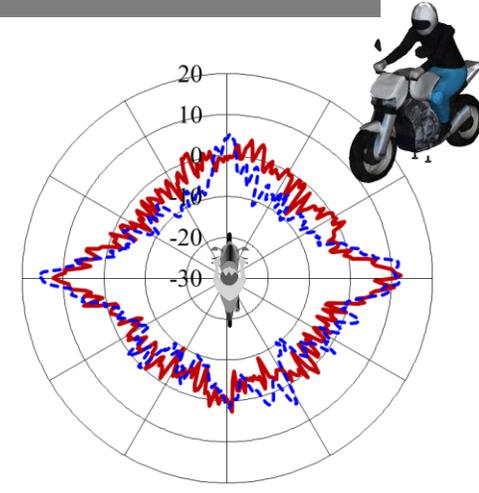
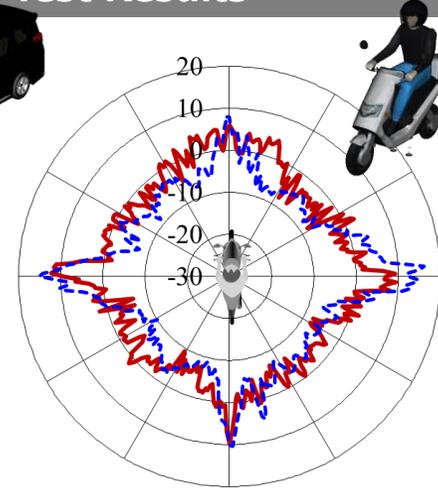
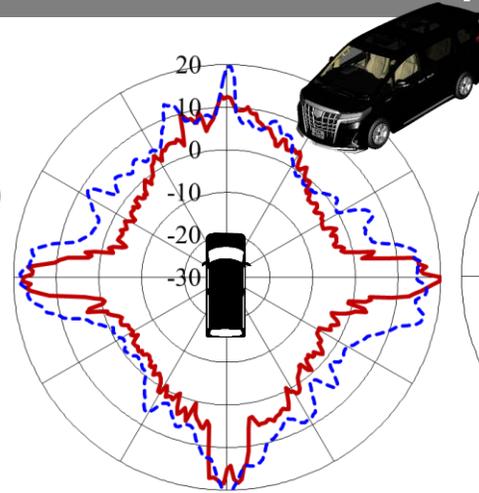
DIVPでのRCS計算例

Test environment



Test Results

— Exp
- - - - DIVP
(PO近似)



面内平均
[dBsm]

Alphard
2.18 6.8

NCAP E-Scooter
-1.0 -2.6

NCAP PTW
-1.5 -3.0

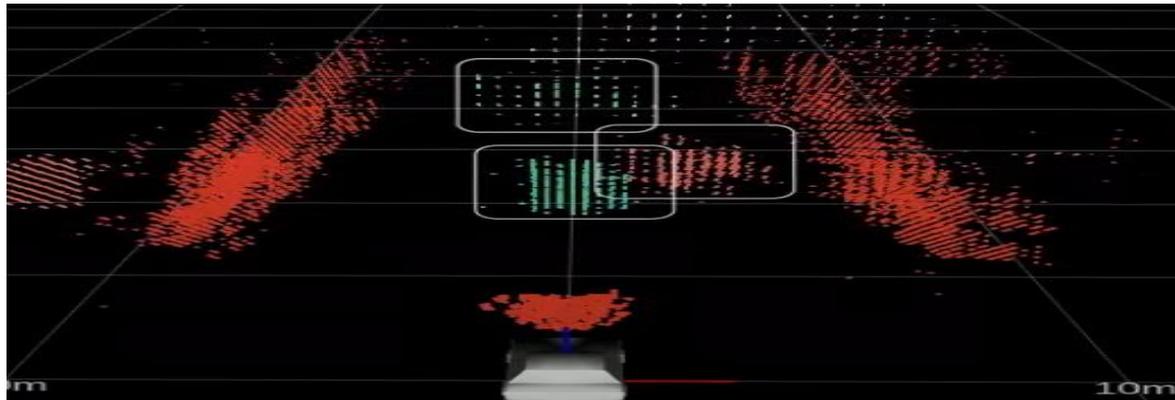
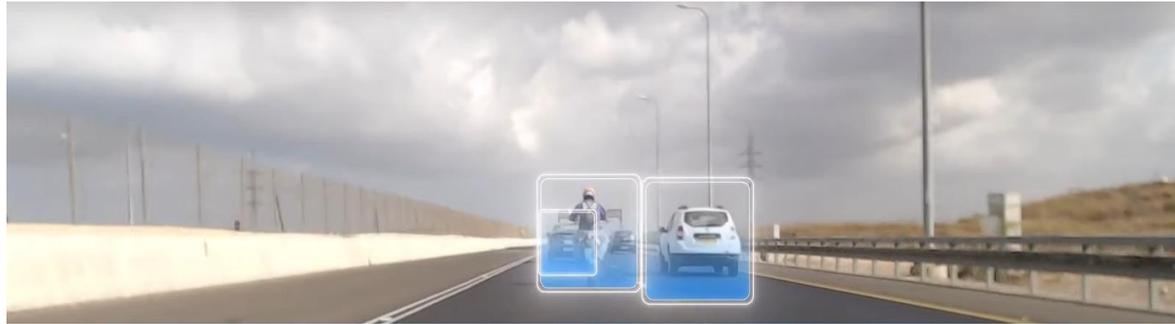
PO近似のRCSは、実測のRCS結果と良い一致性を示す
ただし、PO近似は物標に対して、1つの散乱点しか発生しない

6

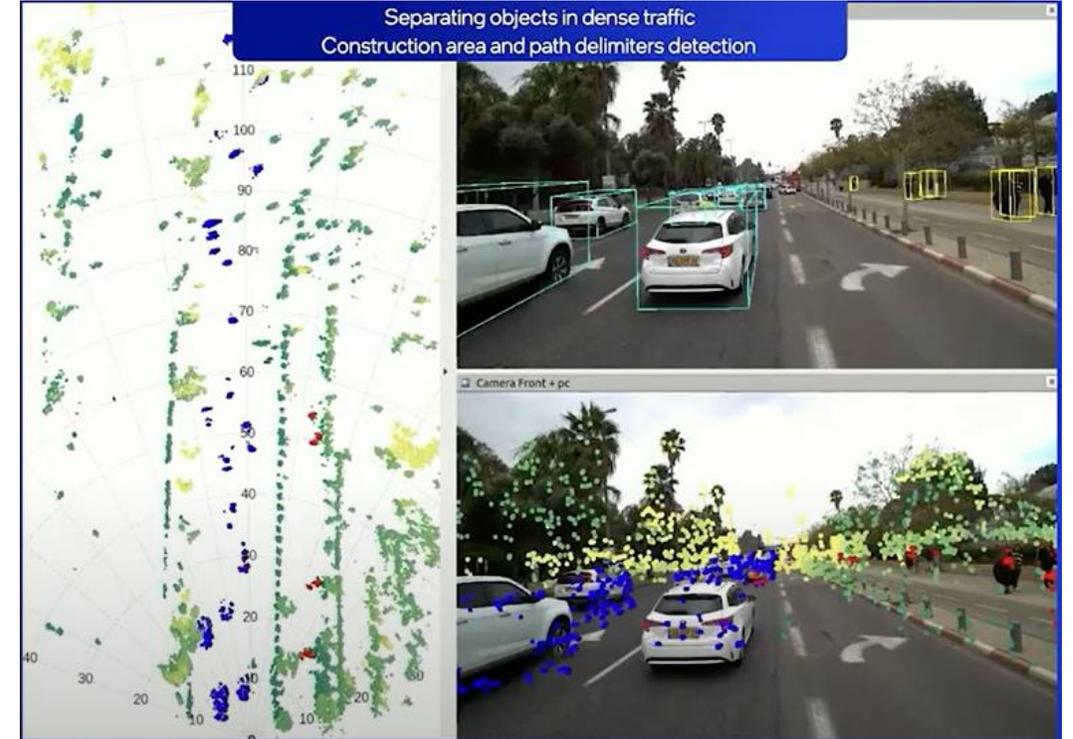
DIVPでの散乱点の再現方法について

最新のレーダ動向（イメージングレーダ）

CONFIDENTIAL
関係者外秘



Source: [Phoenix Imaging Radar - Arbe \(arberobotics.com\)](https://arberobotics.com)



Source: [CES 2022 - mobile eye](#)

レーダの分解能が向上し、1つの車両から複数の散乱点が検出されるようになってきている

反射点の再現方法の考え方

CONFIDENTIAL
関係者外秘



Source : MITSUBISHI PRECISION CO.,LTD.



Source : Denmaru Maker

3Dモデルを複数のメッシュグループに分割
グループ毎にPO計算して複数散乱点を再現

散乱点の発生要因が明らかでないため
メッシュグループの分割方法が分からない

一般的な3Dモデル



○ 散乱点

カメラシミュレーション用途であるため、色でメッシュ分けされていることが多い

バンパの樹脂とボンネットの金属など、反射の異なる物質が同じメッシュグループになっているため、レーダシミュレーションでは使いづらい

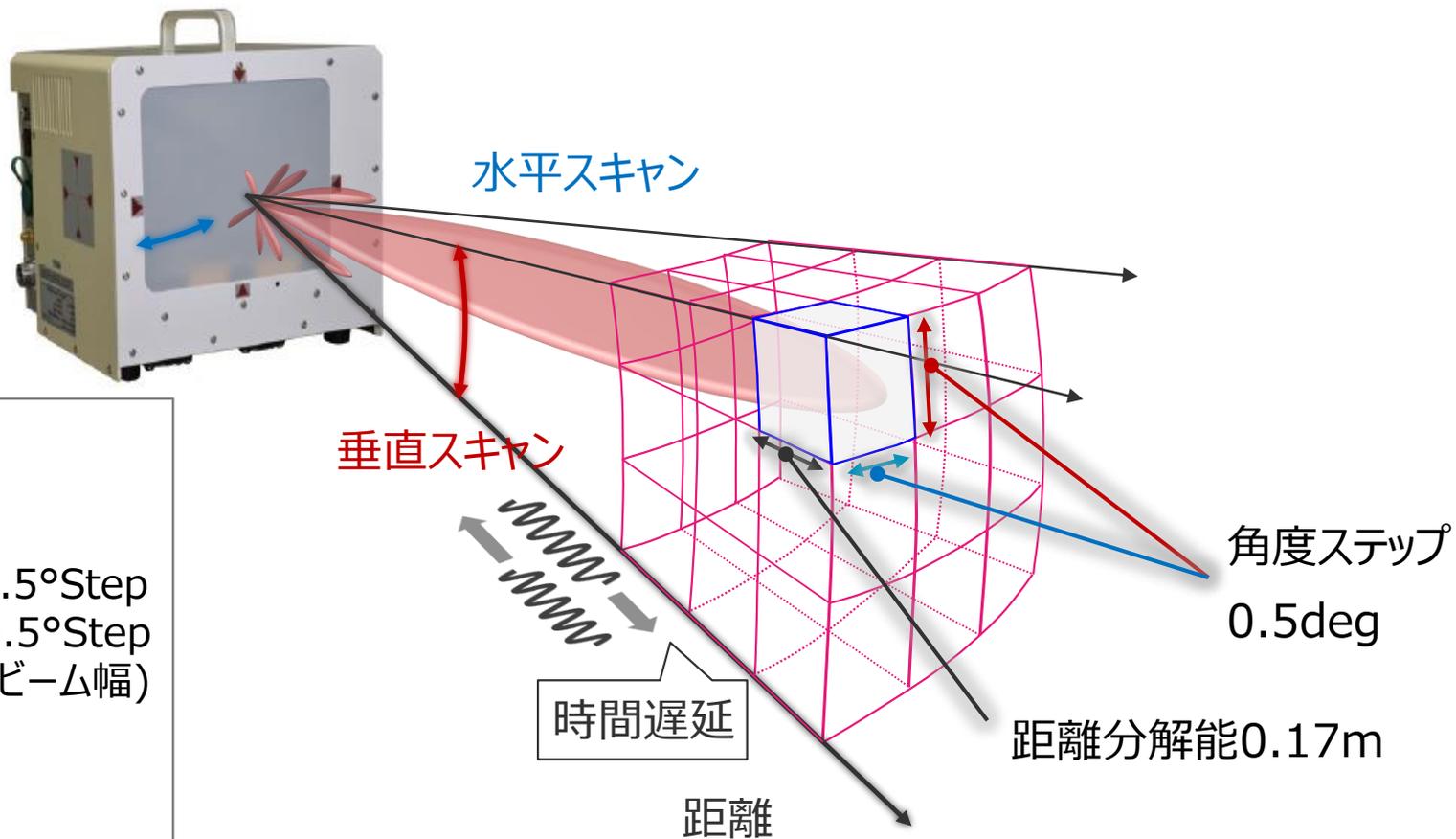
実測による散乱点の可視化

CONFIDENTIAL

関係者外秘

イメージングレーダ

- メーカー Keycom
- 型式 RCS11-76.5G



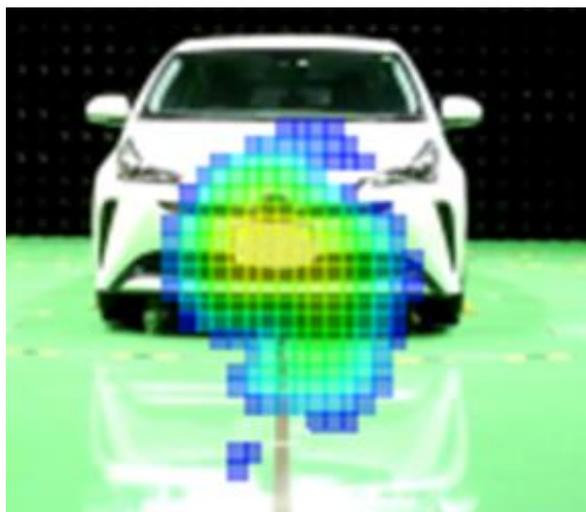
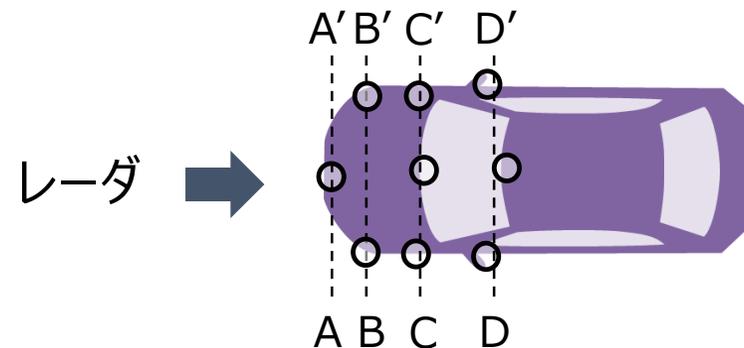
主な仕様

レーダ方式	FMCW
周波数	76.5GHz
周波数帯域幅	900MHz (Custom)
測定角度範囲	水平：-16.5度～16.5° 0.5°Step 垂直：-10度～10度 0.5°Step
測定角度分解能	3度(送受アンテナ利得 6dBビーム幅)
最大検知距離	80m
測定距離分解能	0.17m
寸法	215×232×311mm
重量	約5kg

量産ミリ波レーダよりも性能が高い機械スキャン式のイメージングレーダで散乱点を視える化

イメージングレーダによる散乱点の可視化結果

CONFIDENTIAL
関係者外秘



A-A'面



B-B'面



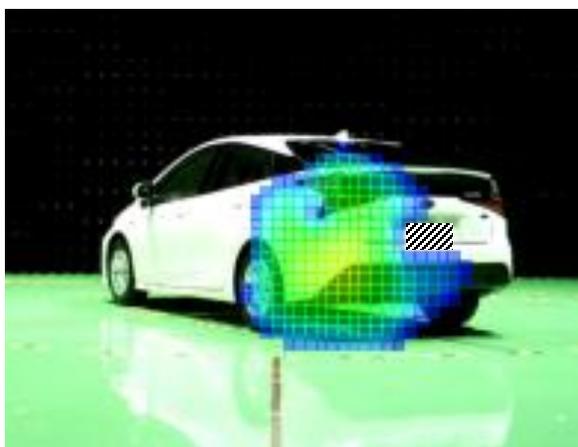
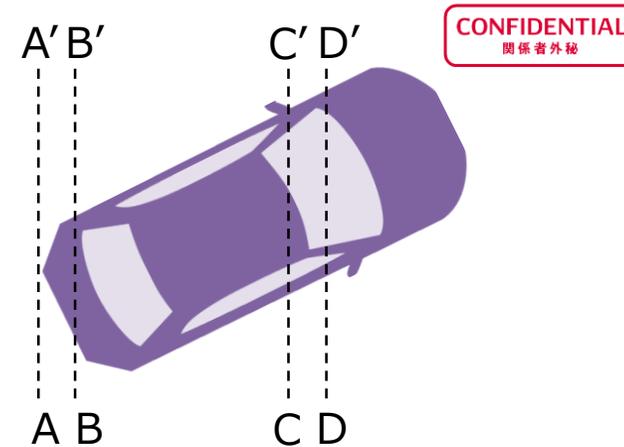
C-C'面



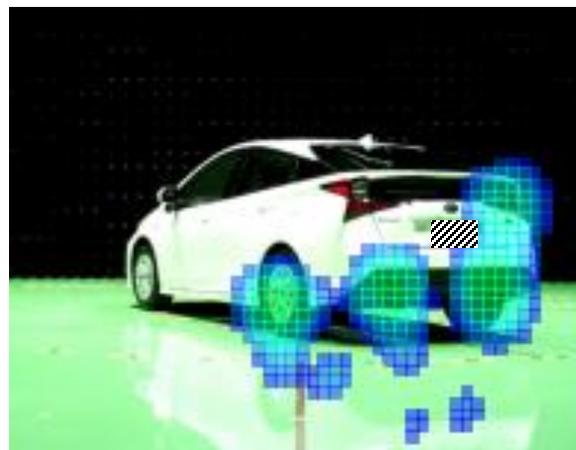
D-D'面

イメージングレーダによる散乱点の可視化結果

レーダ →



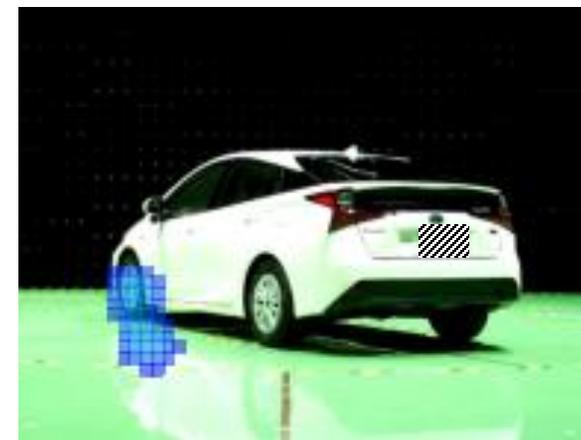
A-A'面



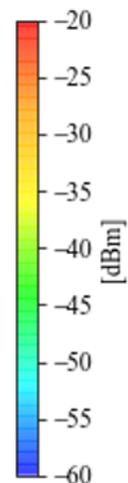
B-B'面



C-C'面



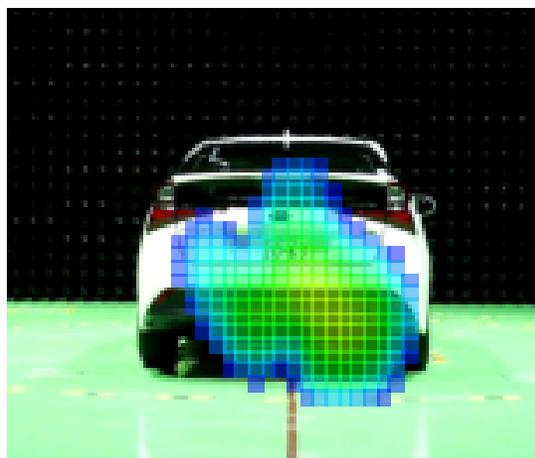
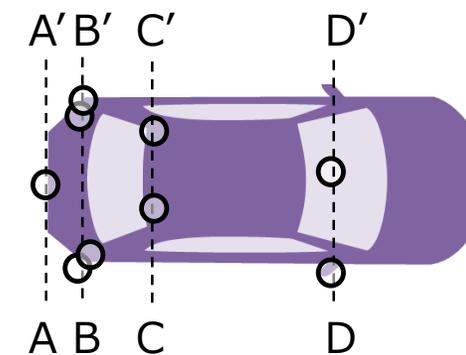
D-D'面



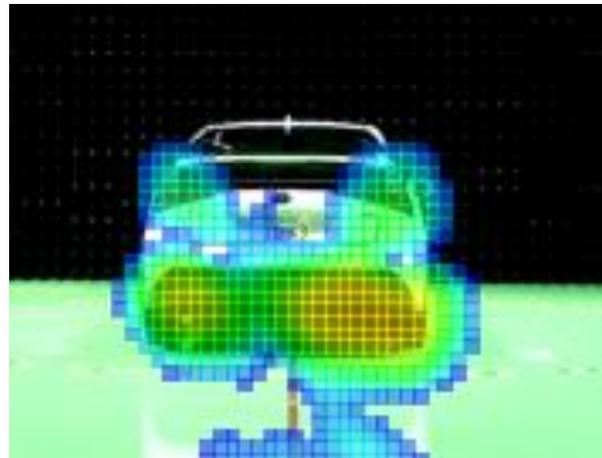
イメージングレーダによる散乱点の可視化結果

CONFIDENTIAL
関係者外秘

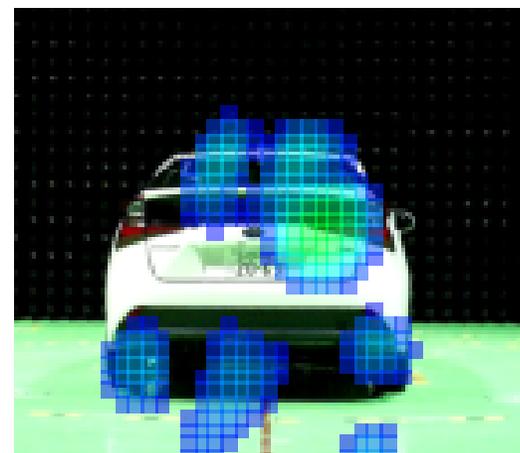
レーダ →



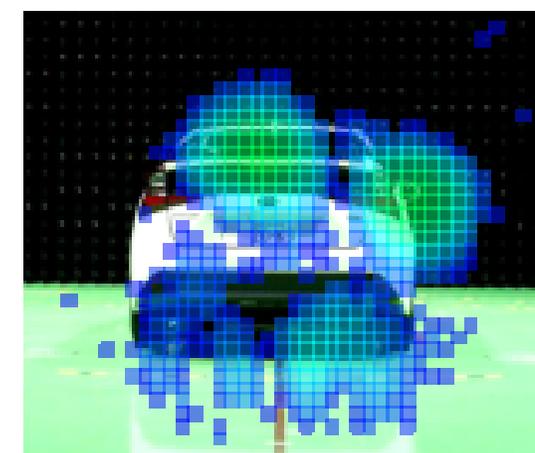
A-A'面



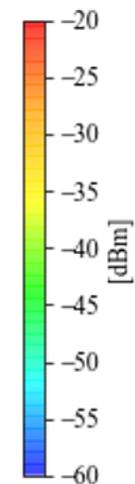
B-B'面



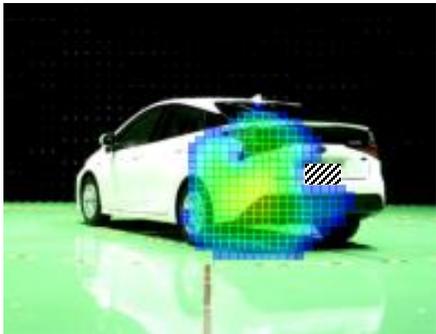
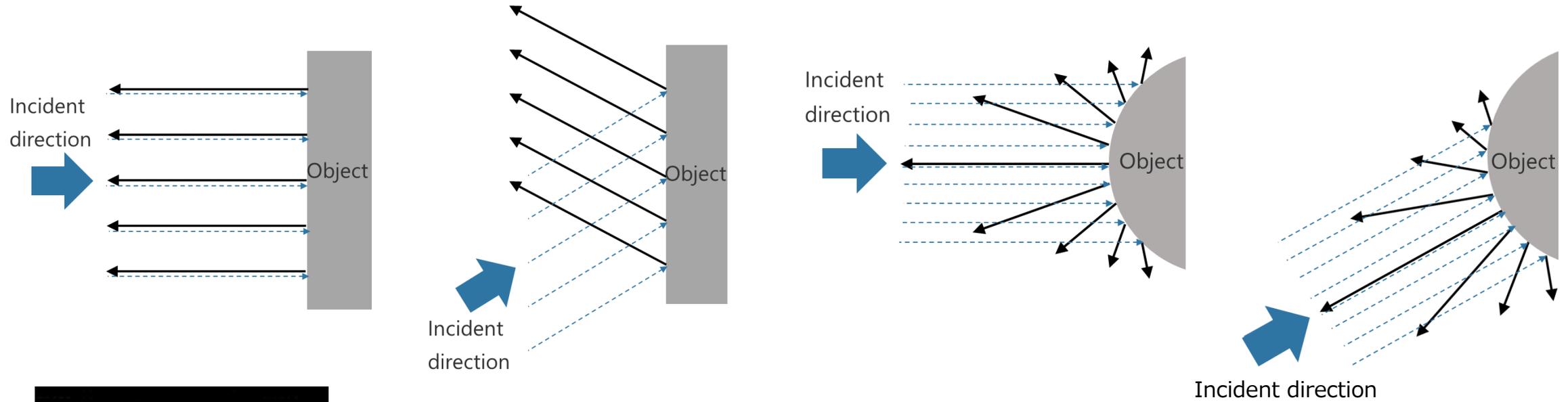
C-C'面



D-D'面

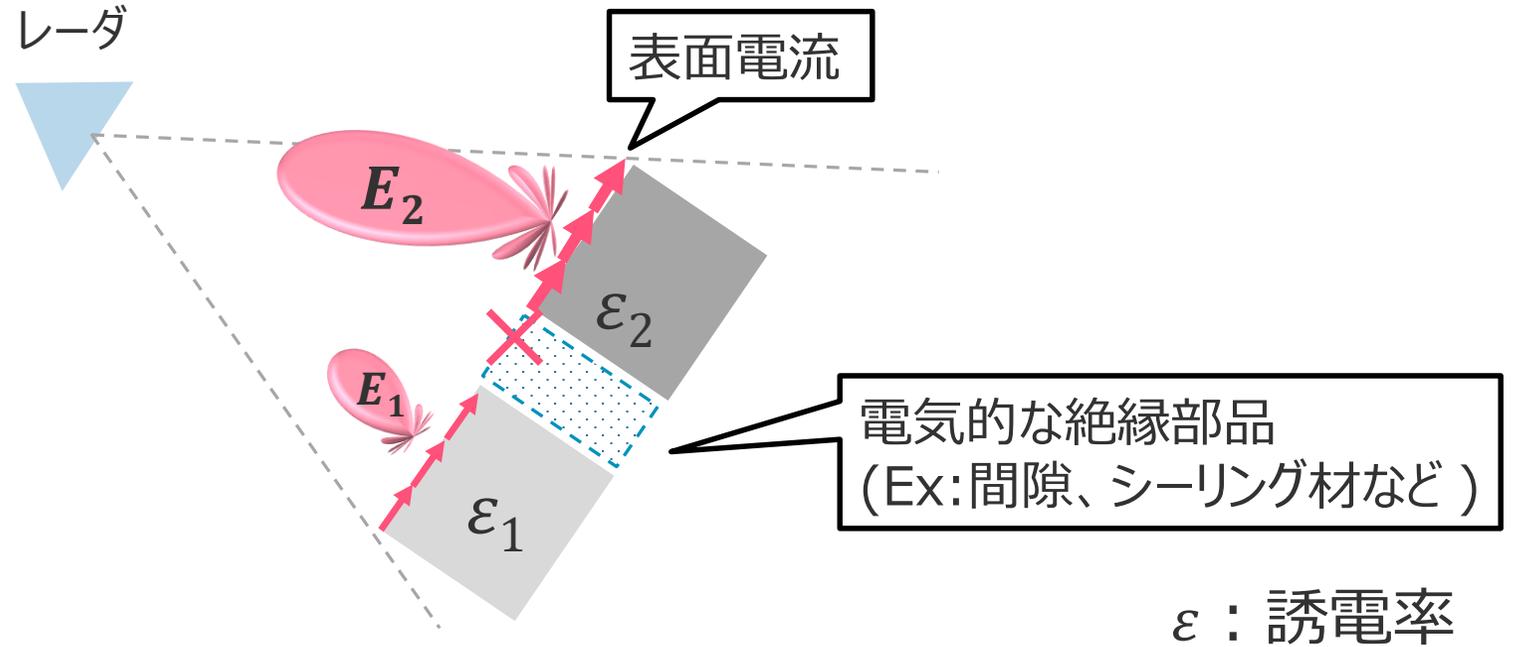


散乱点の発生個所の分析



散乱点は曲面部から得られやすい特徴がある

散乱点の発生個所の分析

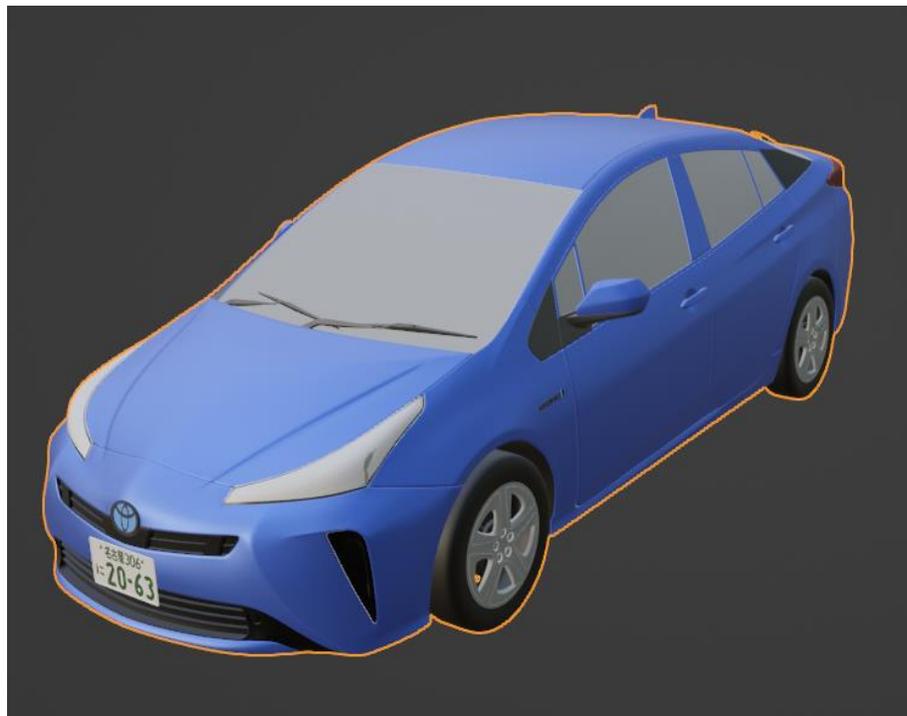


表面電流の非連続性によって、散乱点が複数に分割される

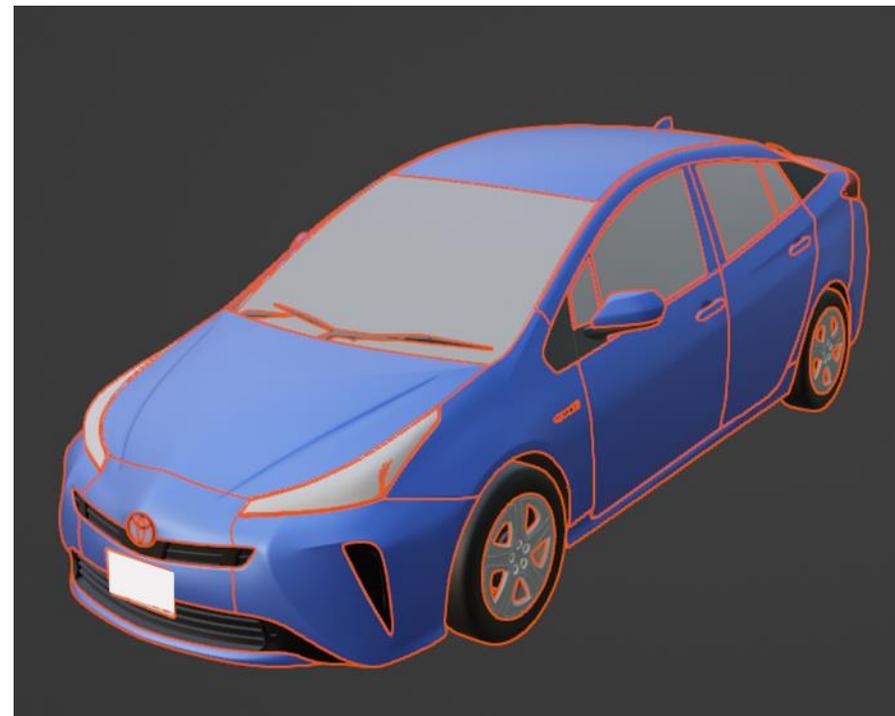
ミリ波レーダ向け 3Dモデル

CONFIDENTIAL

関係者外秘



一般的な 3Dモデル



ミリ波レーダ用 3Dモデル

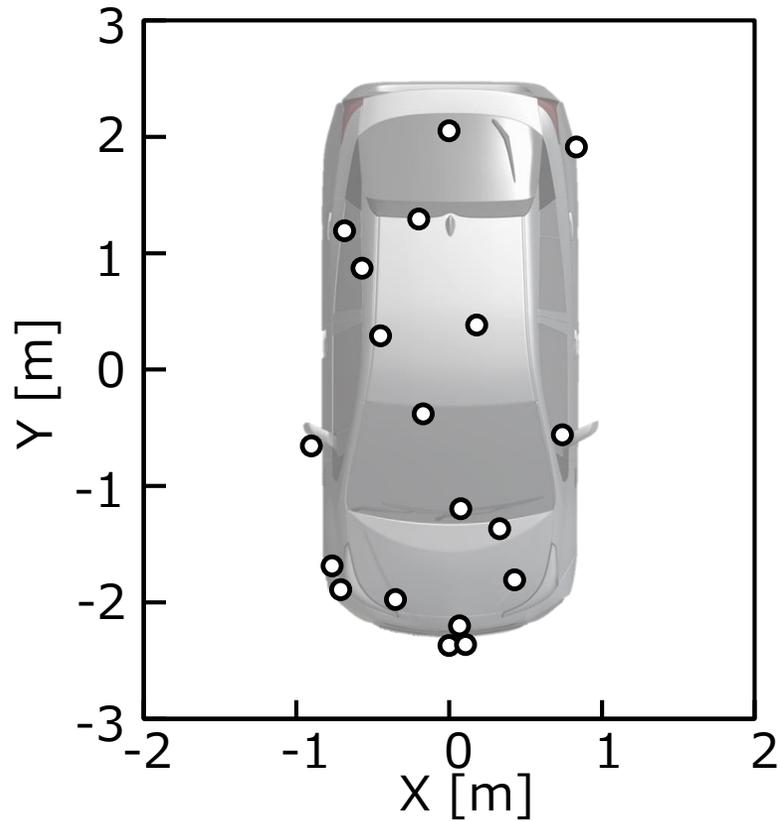
*特開2023-176563

コーナー部や電流の非連続性を考慮して、メッシュを複数グループに分割
DIVPではミリ波レーダの散乱点を考慮した 3Dモデルを提供

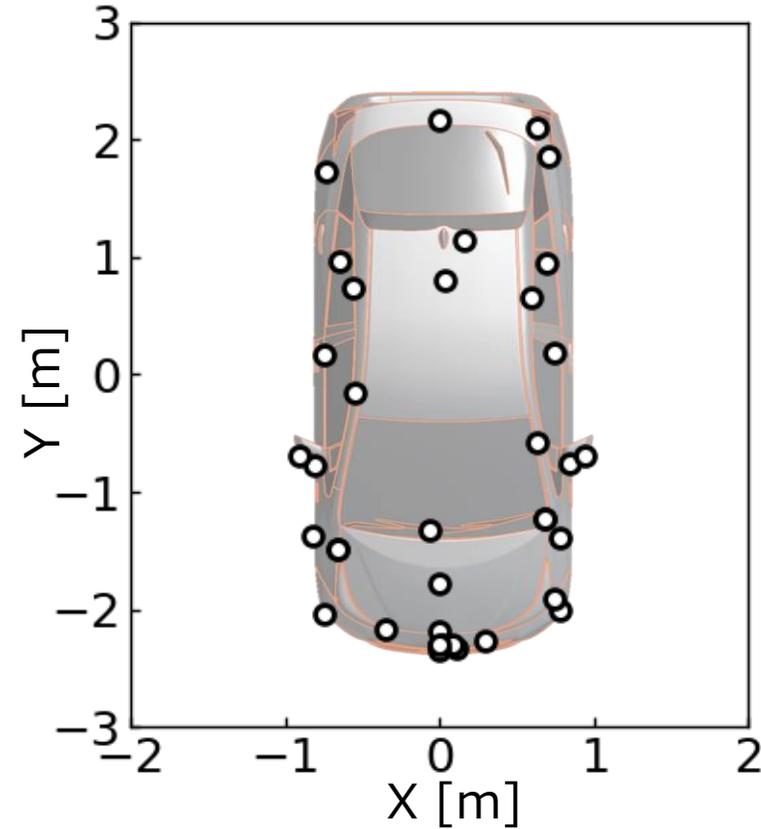
散乱点の再現性検証

○ : 散乱点

実測 (イメージングレーダ)



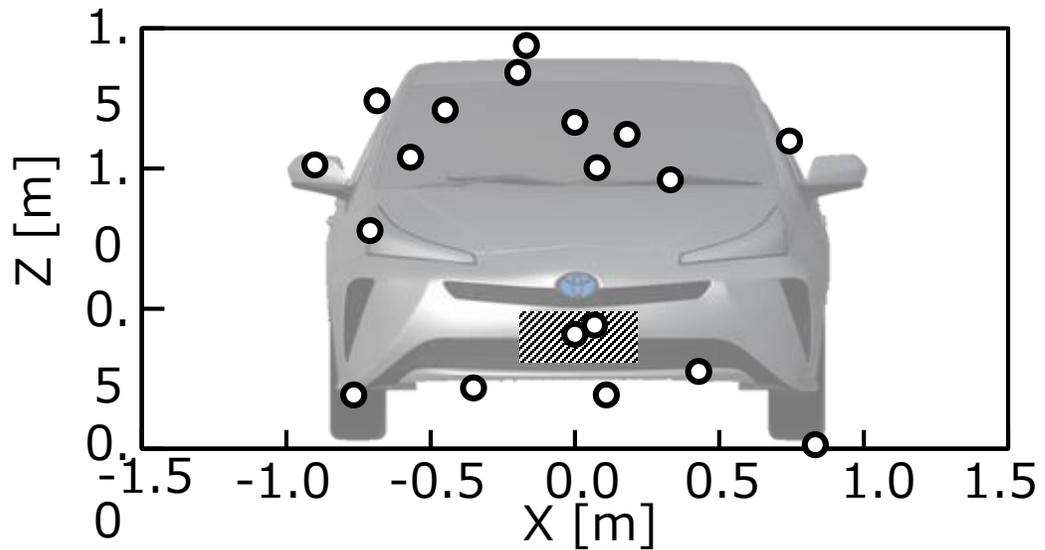
シミュレーション(開発モデル使用)



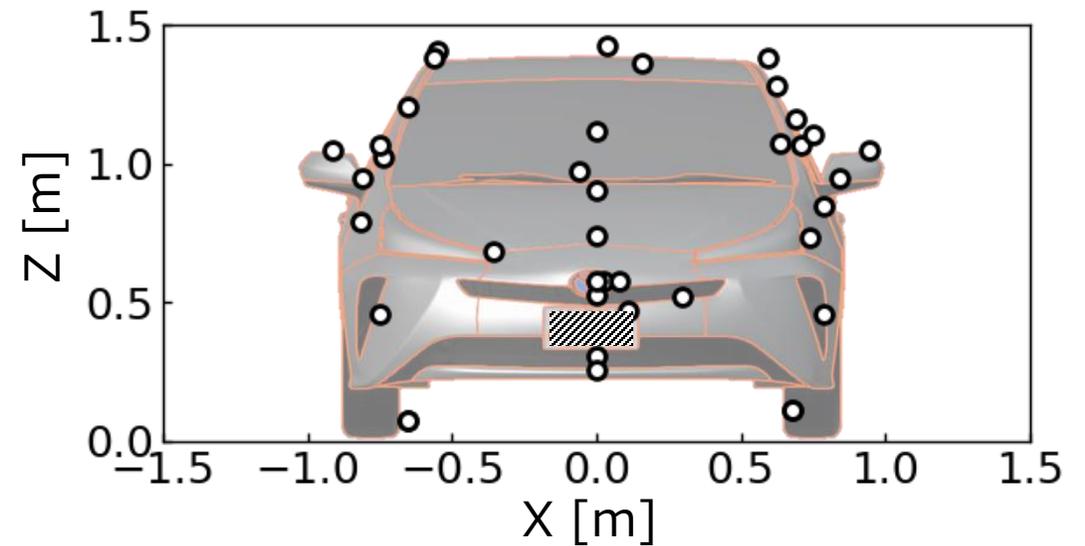
散乱点の再現性検証

○ : 散乱点

実測 (イメージングレーダ)



シミュレーション(開発モデル使用)



- ミリ波レーダシミュレーションには反射率、RCSが必要
- DIVPでは実測に基づいたミリ波レーダ用反射率・RCSデータベースを提供
- DIVPではミリ波レーダの散乱点を考慮した3Dモデルを提供

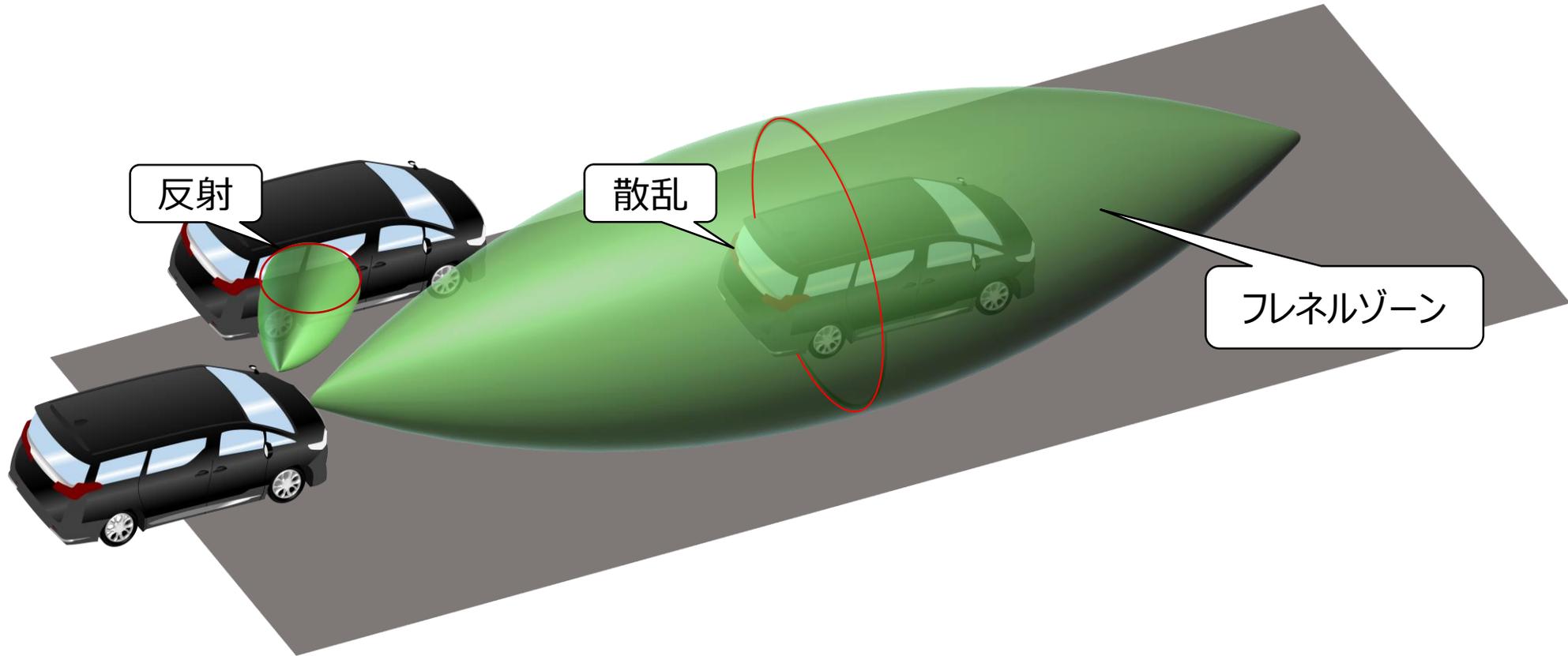
- DIVPでは、本内容をASAM OpenMaterialに提案し、国際標準化活動を進めています

<https://www.asam.net/project-detail/asam-openmaterial/>

添付資料

散乱と反射の違い

CONFIDENTIAL
関係者外秘

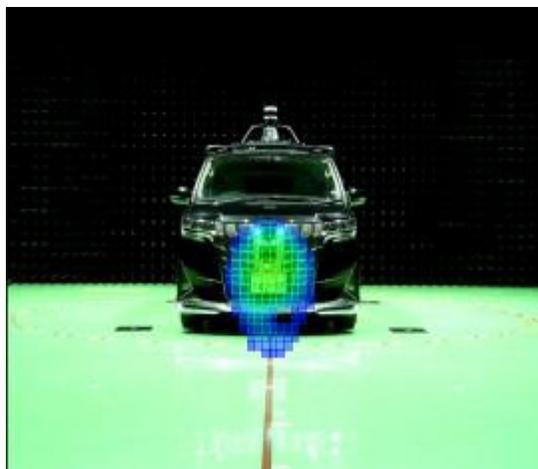
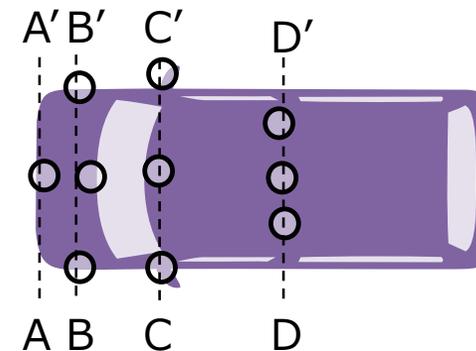


実際には、距離によって反射体として振舞うか、散乱体として振舞うかが変化します
DIVPでは、反射体・散乱体を物標毎に固定としています(ユーザ設定)

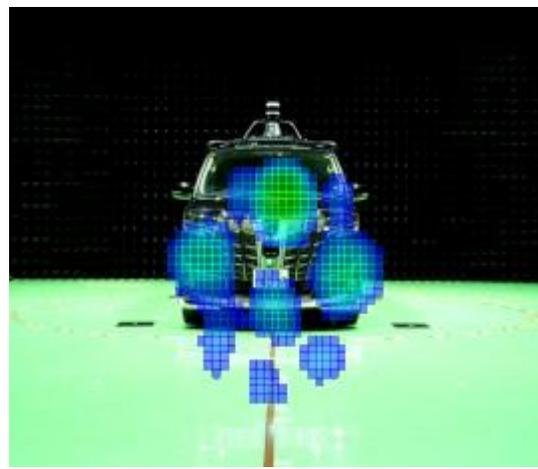
イメージングレーダによる散乱点の可視化結果

CONFIDENTIAL
関係者外秘

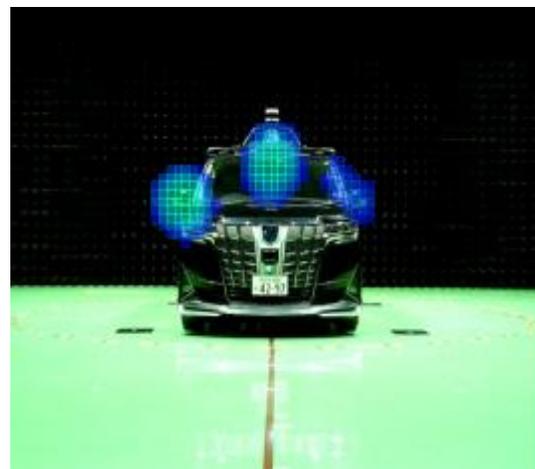
レーダ →



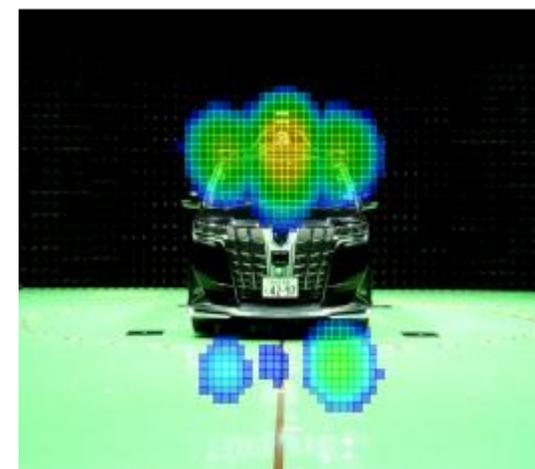
A-A'面



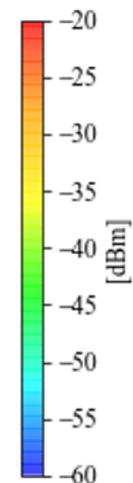
B-B'面



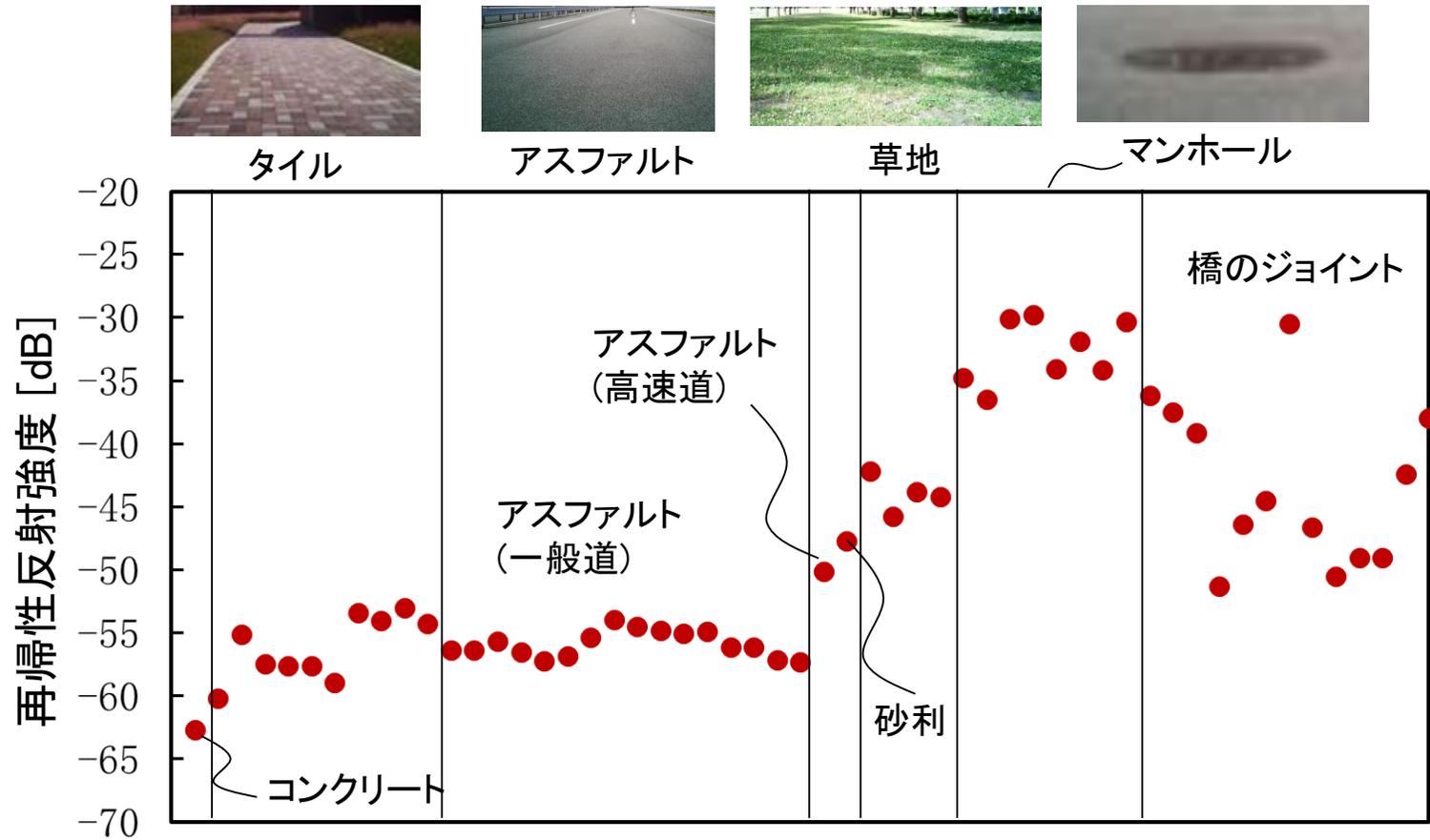
C-C'面



D-D'面



路面再帰反射特性計測結果



再帰性反射の一致性検証

CONFIDENTIAL
関係者外秘

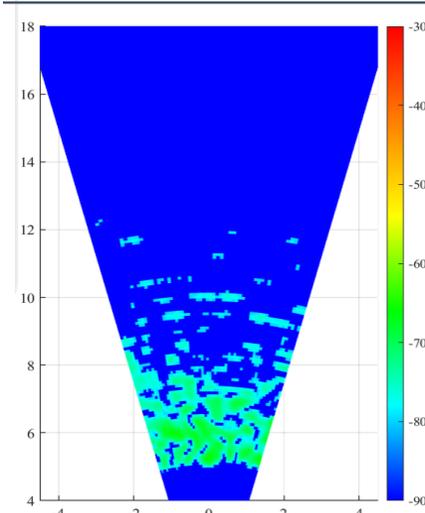


一般道アスファルト



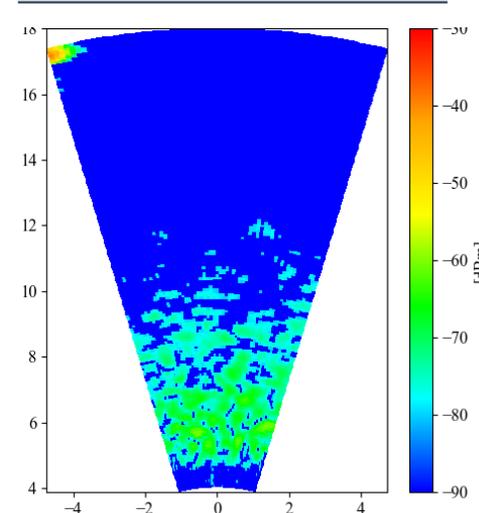
草地

シミュレーション



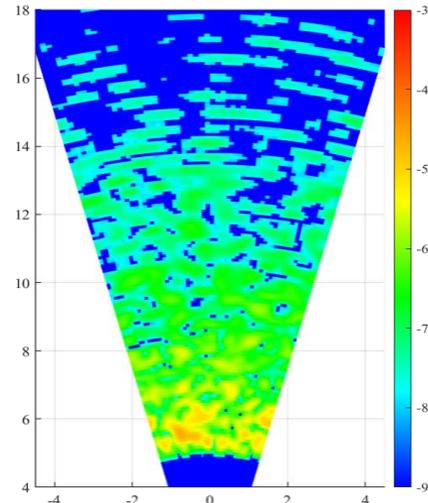
-75.58 [dB]

実測

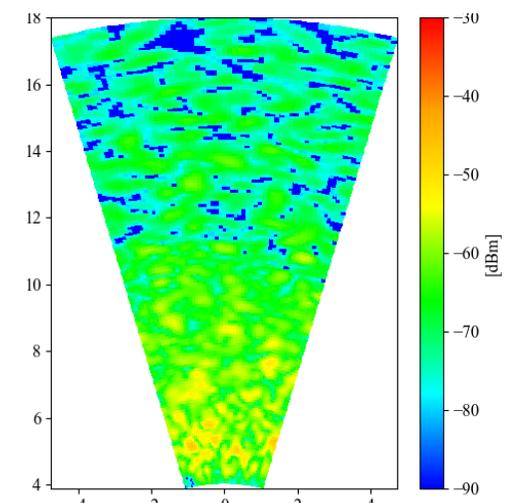


-74.47 [dB]

5~10m区間受信電力中央値



-62.88 [dB]



-61.07 [dB]

反射率ファイルはカメラ・LiDAR・ミリ波レーダ共通ファイル書式 様々な測定器の結果から作成が可能

SOKEN

DIVPにおける実測データ変換例

