

# 「DIVP-PFのRadarセンサモデル、およびシミュレーション事例」

## 発表者プロフィール



■ 天野 義久

■ y.amano@cco.kanagawa-it.ac.jp

元は、電機業界の高周波無線通信回路屋でした。  
自動車業界にきたタイミングでちょうど高周波技術の結晶であるミリ波レーダが車に普及し始め、その波に乗ってミリ波レーダ技術者（ハード・信号処理ソフト）へ転身しました。

更にDIVPに参加したことが縁で、現実世界のレーダ技術者から、仮想世界の3大センサ技術者への成長を目指しています。

## 経歴

- 京都大学 工学部 電気学科卒
- 電機メーカ（京セラ、シャープ）にて、ミリ波無線通信回路、スマホやWiFi電子部品、電磁界シミュレータ等を開発。
- 自動車部品メーカ（ユースン）にて、ミリ波レーダを核としてADAS技術を研究している時に、DIVPプロジェクトに参画。前任者（デンソー）からミリ波レーダモデル開発を引き継ぐ。
- 2023年～ 神奈川工科大へ転職しDIVP専任に。



■ 井上 大輔

■ daisuke.inoue@furukawaelectric.com

当社は、情報通信やエネルギーなどのインフラ分野、自動車部品分野、エレクトロニクス分野へ、多岐にわたる技術・製品・サービスを提供しております。

小職は、サステナブルテクノロジー研究所、高周波エレクトロニクス技術センターに所属、レーダ関連の研究開発に従事しております。

## 経歴

- 2002年 古河電工入社  
アンテナ等の高周波関連技術  
レーダやレーダ関連のシミュレーション等にこれまで従事
- 2023年 DIVPコンソーシアム参画(再委託)  
次期型センサモデルの開発（4Dレーダ）に従事



# DIVP-PFのRadarセンサモデル、およびシミュレーション事例

神奈川工科大学 特任研究員 天野  
古河電気工業株式会社 井上

*Weather Forecast*



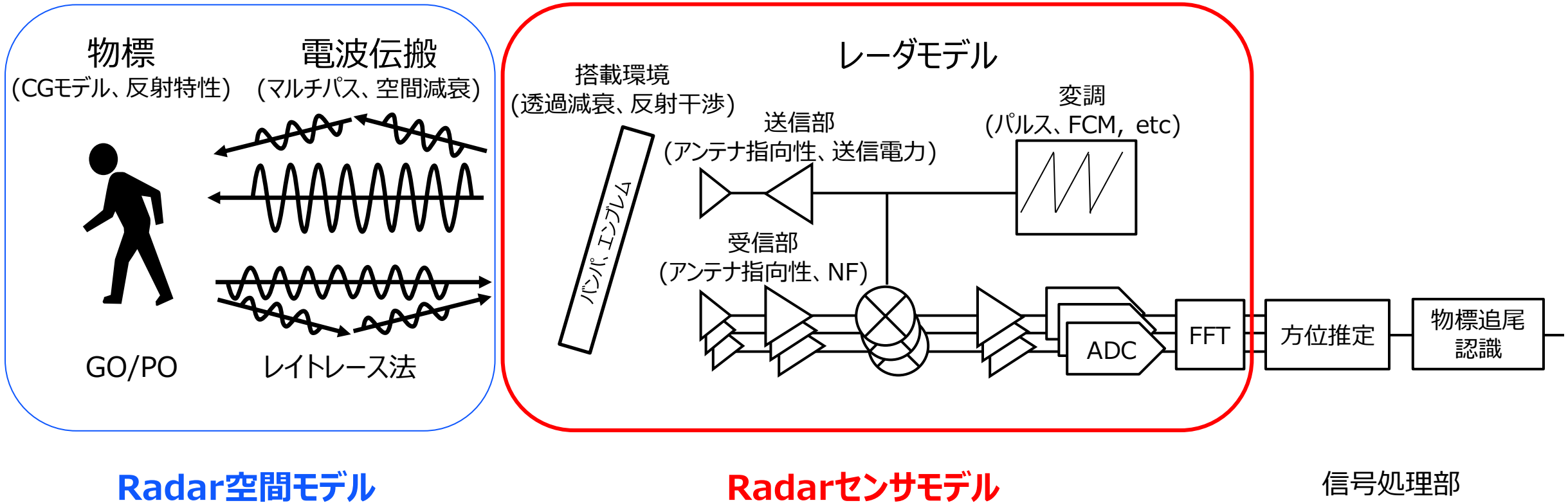
*AD safety Assurance*



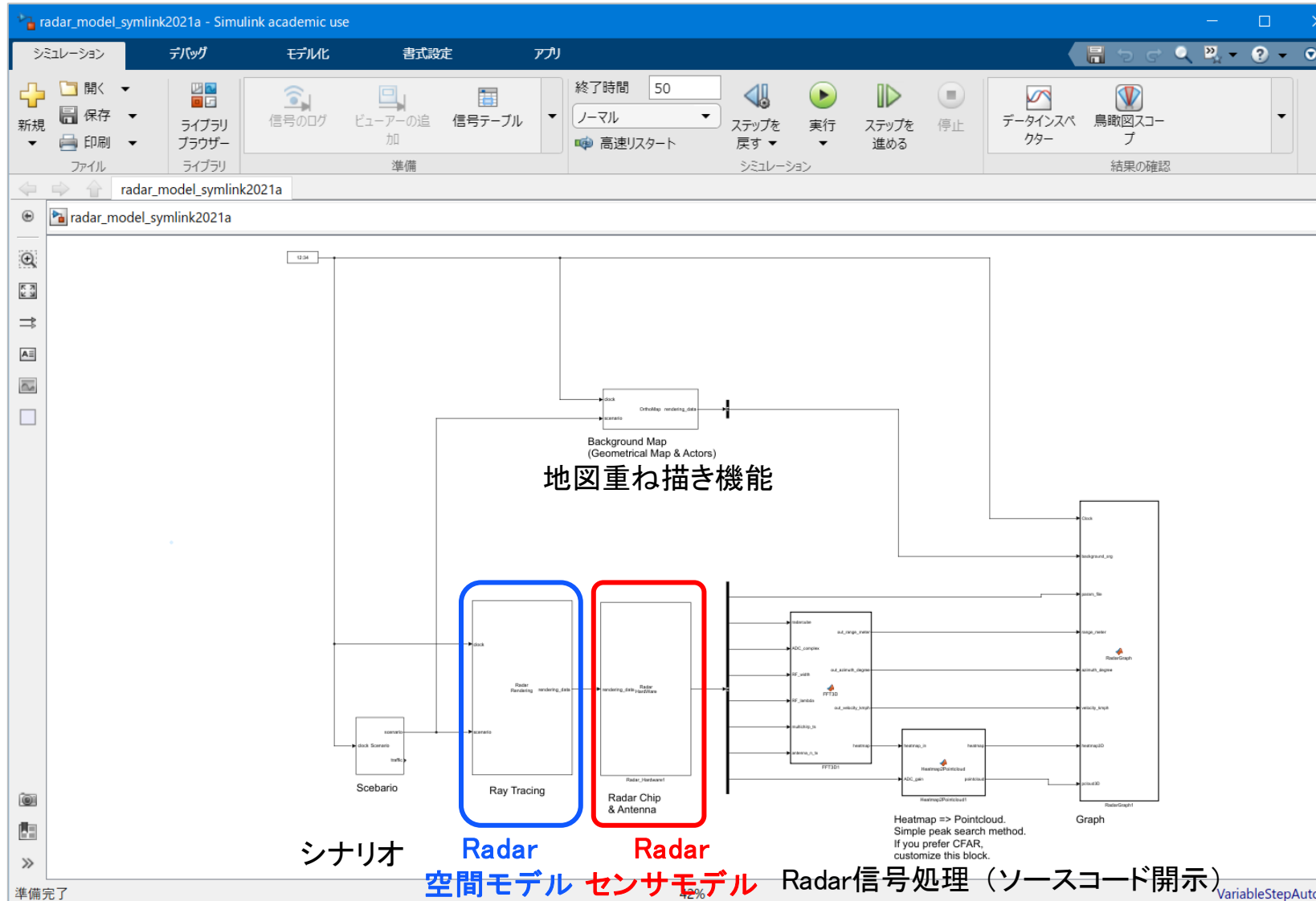
*For Validation & Verification Methodology*

\*AD : Automated driving

# 先ほどの Radar空間モデル に続き、DIVP-PFの Radarセンサモデル の内部を説明します。



# DIVP-PFの、Radar空間モデルとRadarセンサモデル (Simulink版 v0.6.0)



# Agenda

---

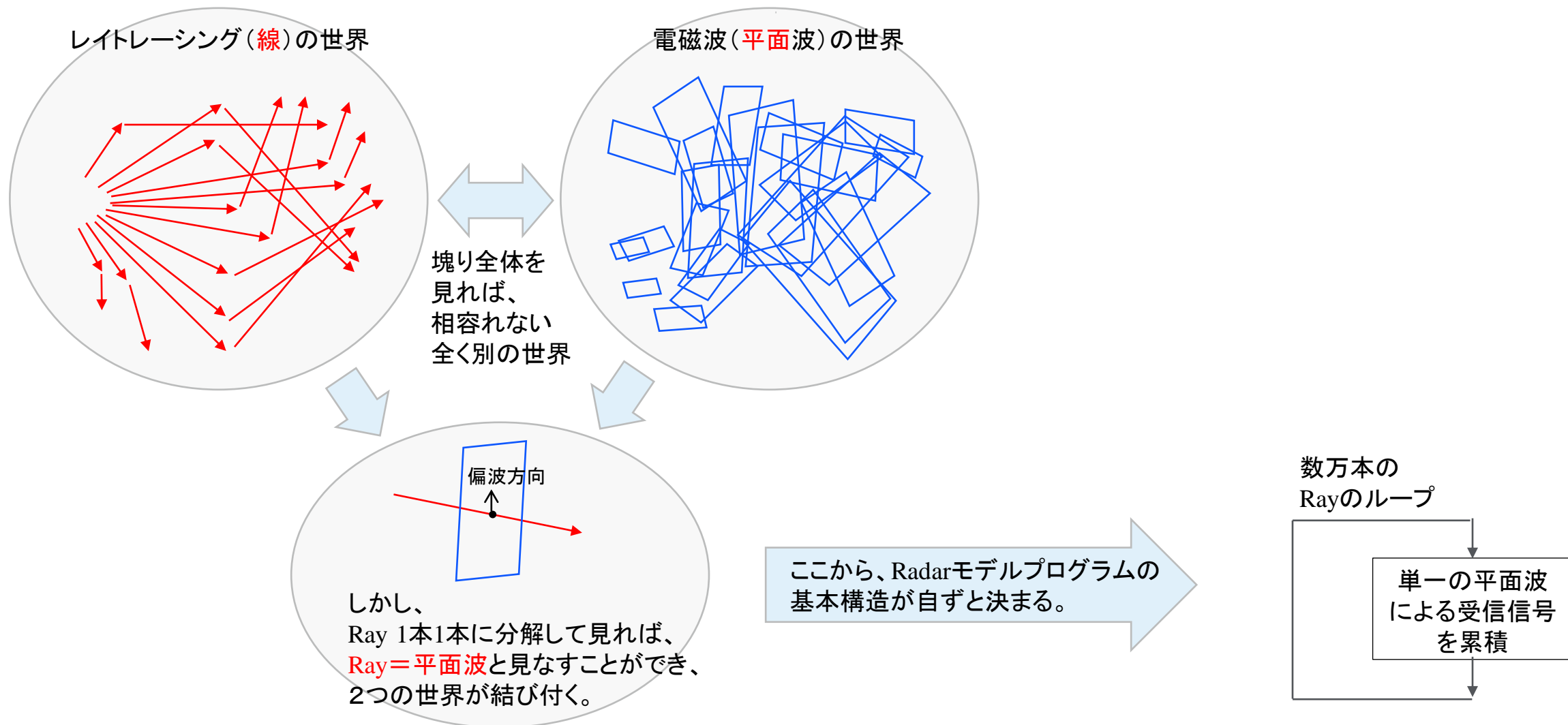
- 1 Radar空間モデルと、Radarセンサモデルを、接続する原理
- 2 Radarセンサモデルに組み込んだ、現実の回路の不完全さ
- 3 Radarセンサモデルを活用した、マルチパスシミュレーション
- 4 Radarセンサの相対速度検出を活かしたアプリケーション
- 5 まとめ

# Agenda

---

1	Radar空間モデルと、Radarセンサモデルを、接続する原理
2	Radarセンサモデルに組み込んだ、現実の回路の不完全さ
3	Radarセンサモデルを用いた、マルチパスシミュレーション
4	Radarセンサの相対速度検出を活かしたアプリケーション
5	まとめ

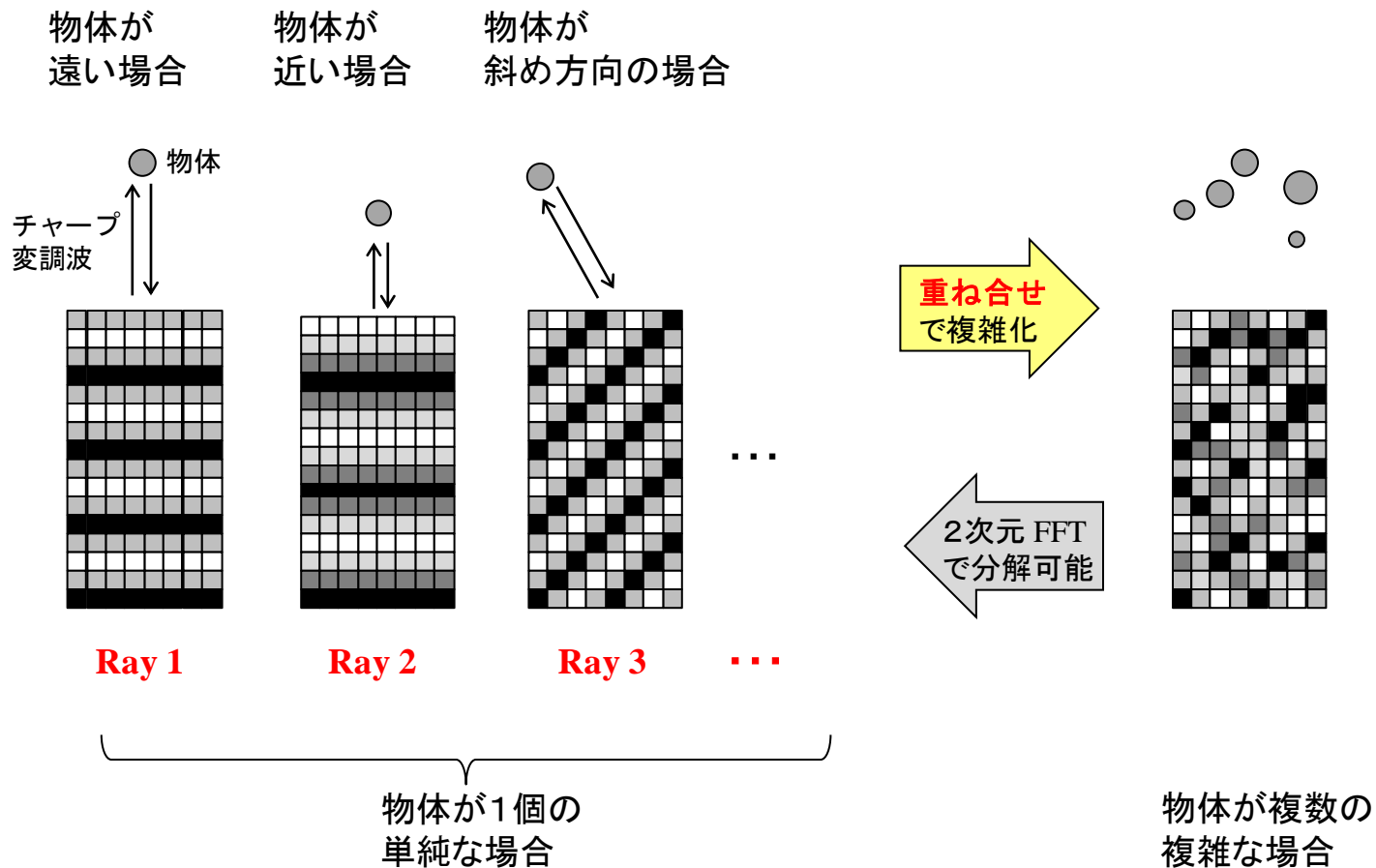
# 空間モデル (Ray Tracing世界) と センサモデル (電磁波世界) を接続する原理



# 数万本のRayが生む受信信号（ADC配列, Radarcube）を、重ね合わせて行く。

数万～数十万本のRayのループ

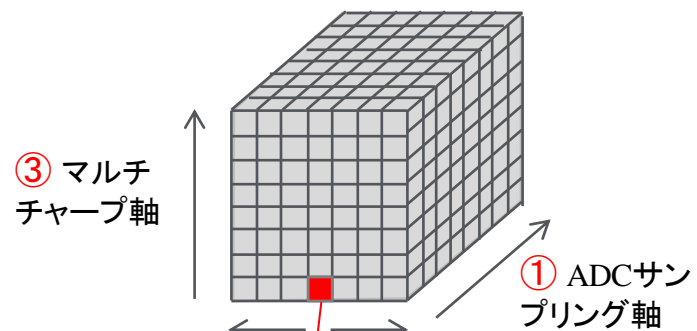
単一の平面波による受信信号を累積





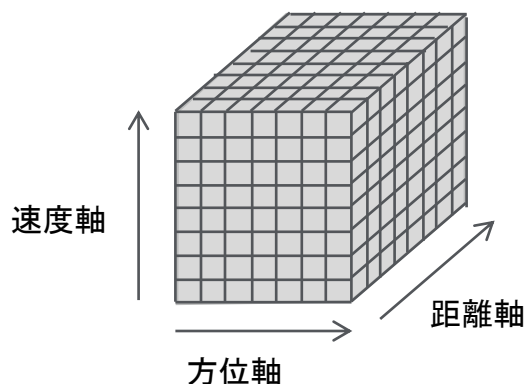
# Radarcubeの効率的な計算法

空間的な2次元Radar  
(速度も含めて3次元)の場合

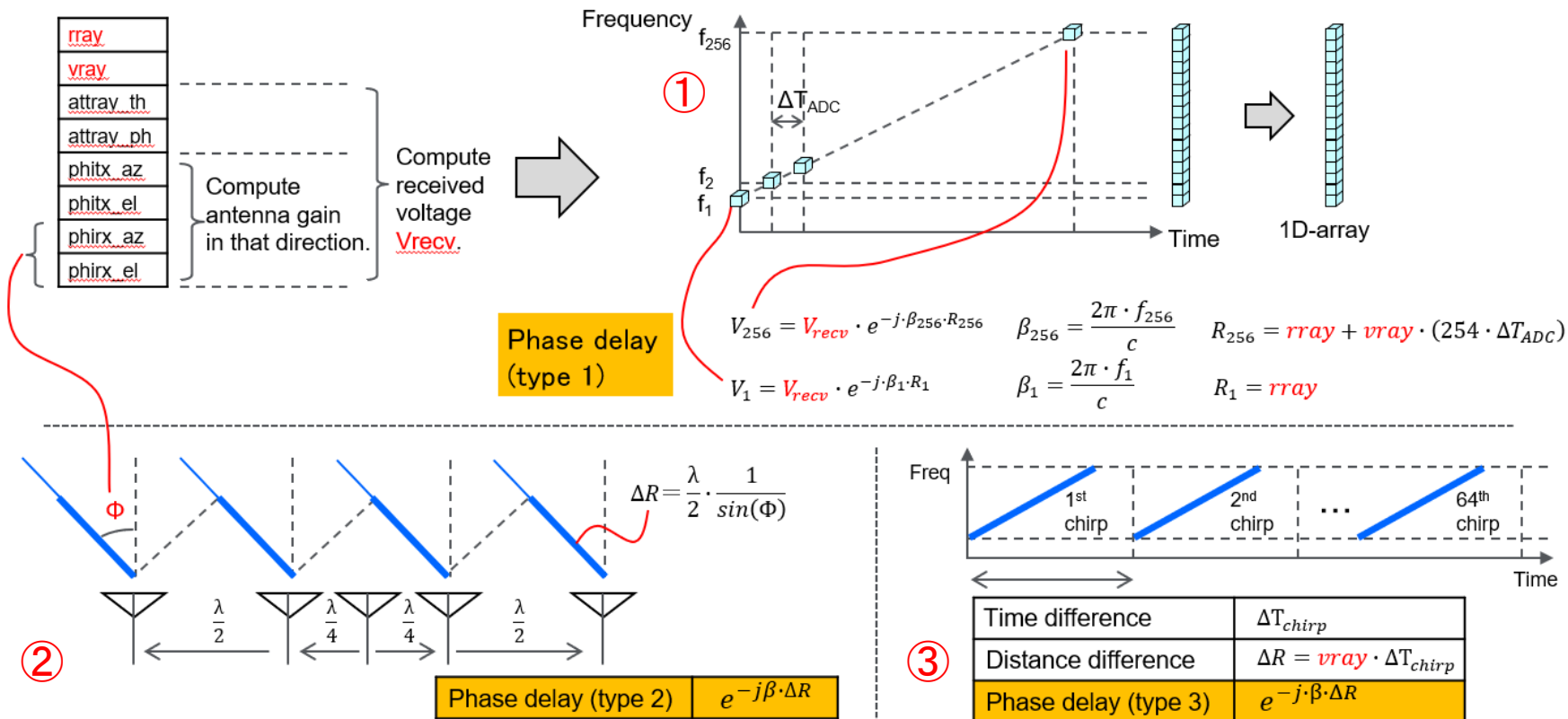


② アンテナ軸 ② アンテナ軸  
レイレーシングはこの一点のみで、  
他は位相回転させながらコピー。

3次元FFT



## Three types of phase delay



14 230918\_EUMW2023 workshop



H. Inoue, Y. Amano, "Physical Modelling for Sensors, Millimeter-Wave Radar, LiDAR, and Camera",  
WF1 EuRAD "Virtual Validation of ADAS with Automotive Sensors", EuMW 2024

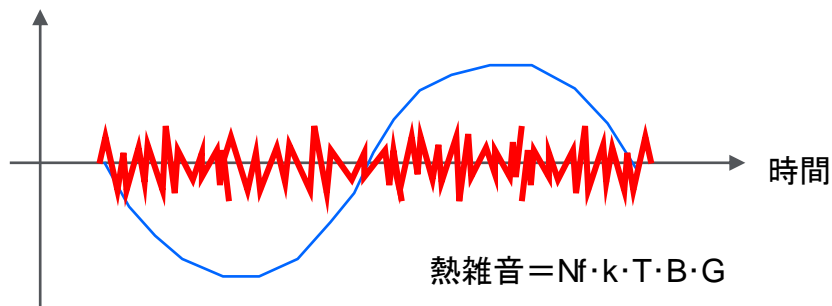
# Agenda

---

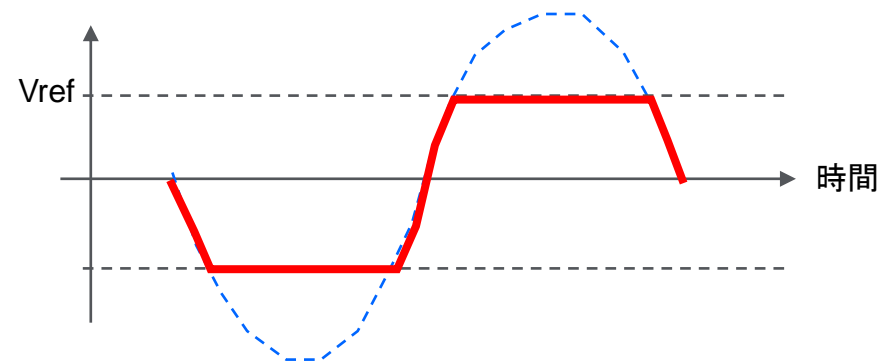
1	Radar空間モデルと、Radarセンサモデルを、接続する原理
2	Radarセンサモデルに組み込んだ、現実の回路の不完全さ
3	Radarセンサモデルを用いた、マルチパスシミュレーション
4	Radarセンサの相対速度検出を活かしたアプリケーション
5	まとめ

# 現実の電子回路の不完全さを、可能な限りモデルに取り込んだ。

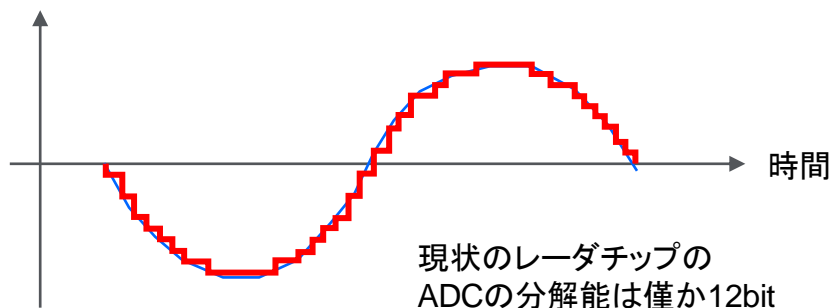
## ① 熱雑音の混入



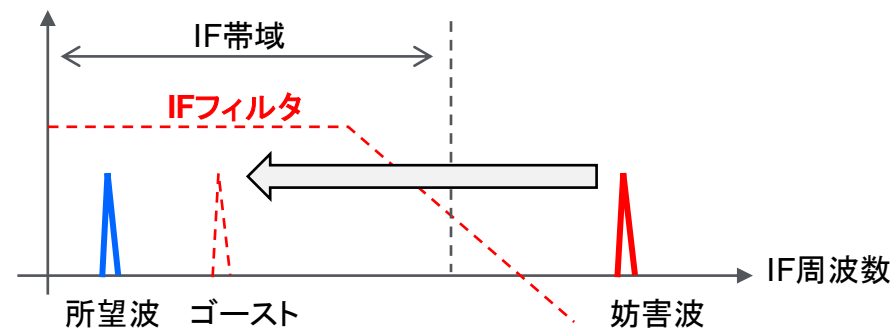
## ③ 過大入力時の、飽和クリッピングによる歪み



## ② 量子化雑音の混入

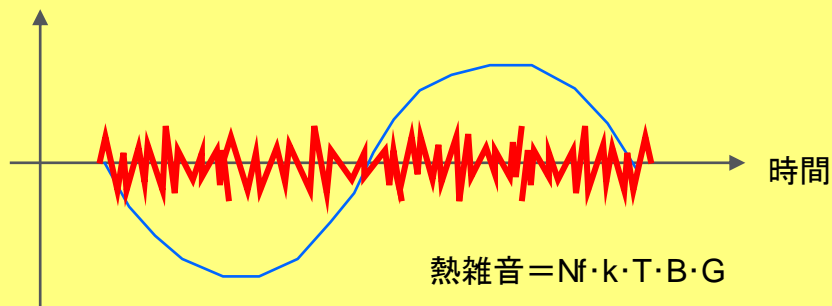


## ④ 不完全なアンチ・エイリアス・フィルタ (IFフィルタ) による、折り返しゴースト

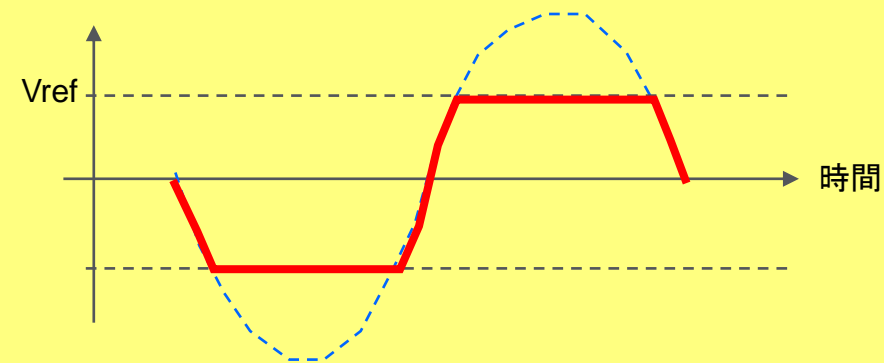


# 現実の電子回路の不完全さを、可能な限りモデルに取り込んだ。

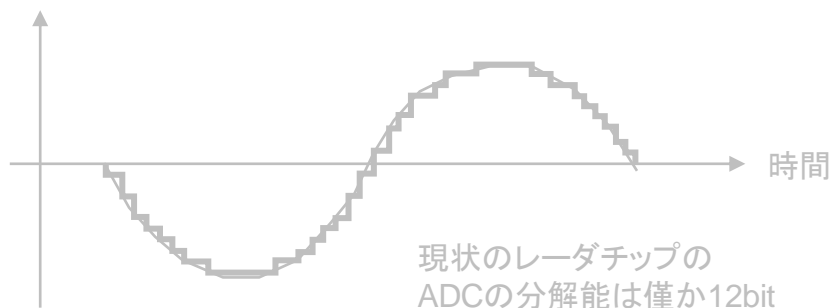
## ① 熱雑音の混入



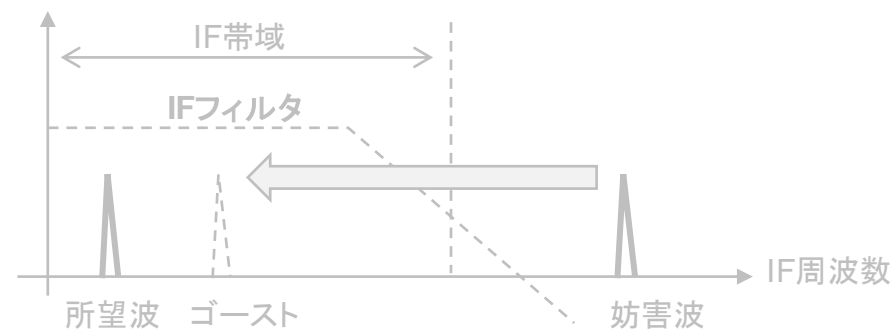
## ③ 過大入力時の、飽和クリッピングによる歪み



## ② 量子化雑音の混入



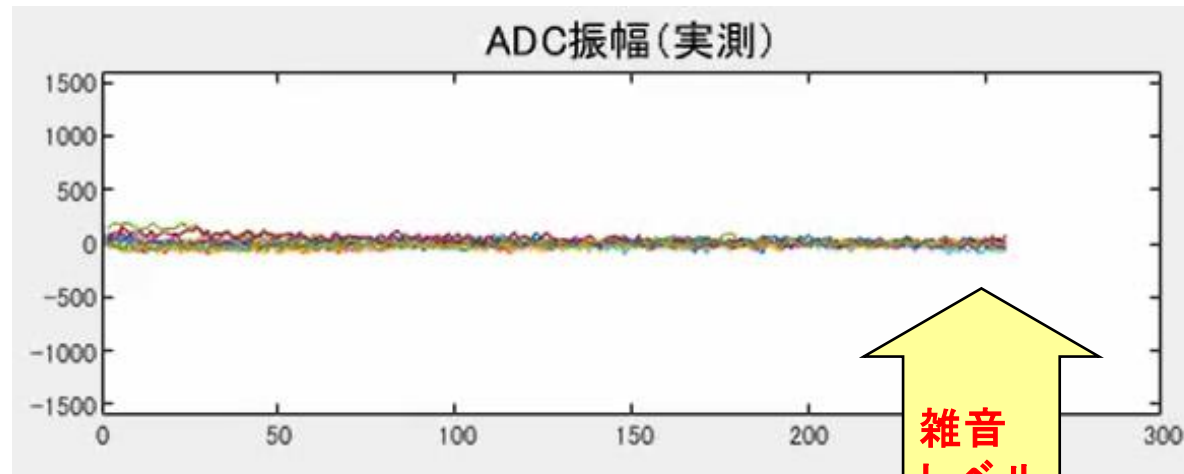
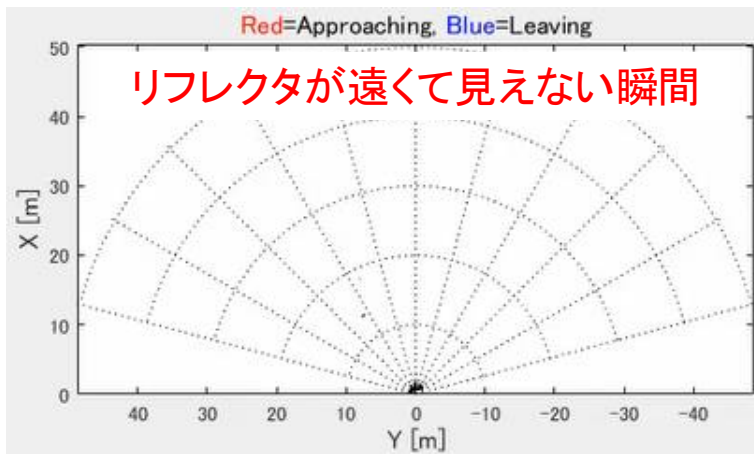
## ④ 不完全なアンチ・エイリアス・フィルタ (IFフィルタ) による、折り返しゴースト



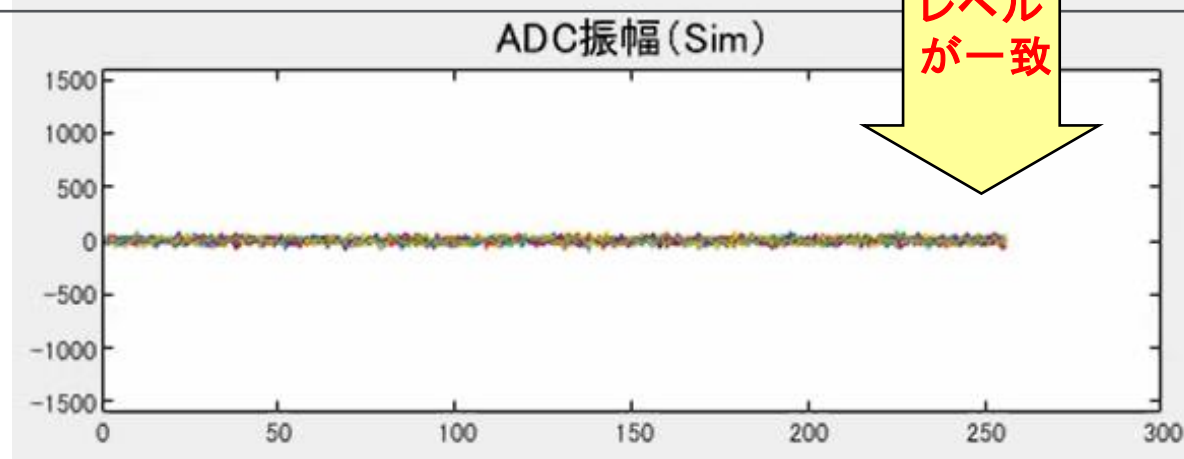
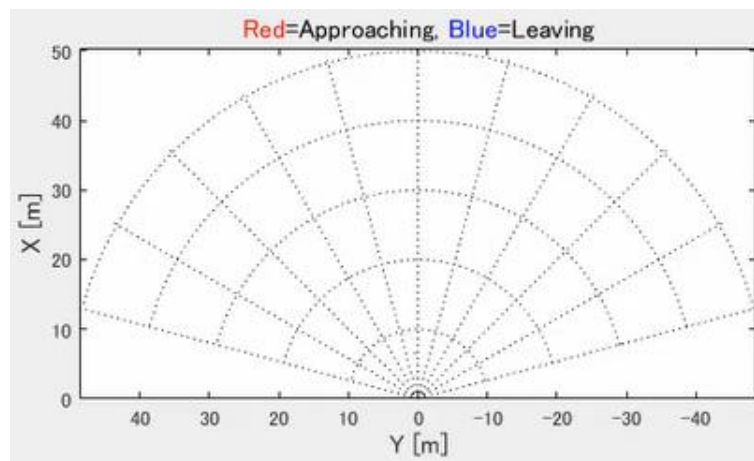
# 実測との比較は、最終のレーダ画像だけでなく、途中のADC値でも実施（1）



実測



Sim



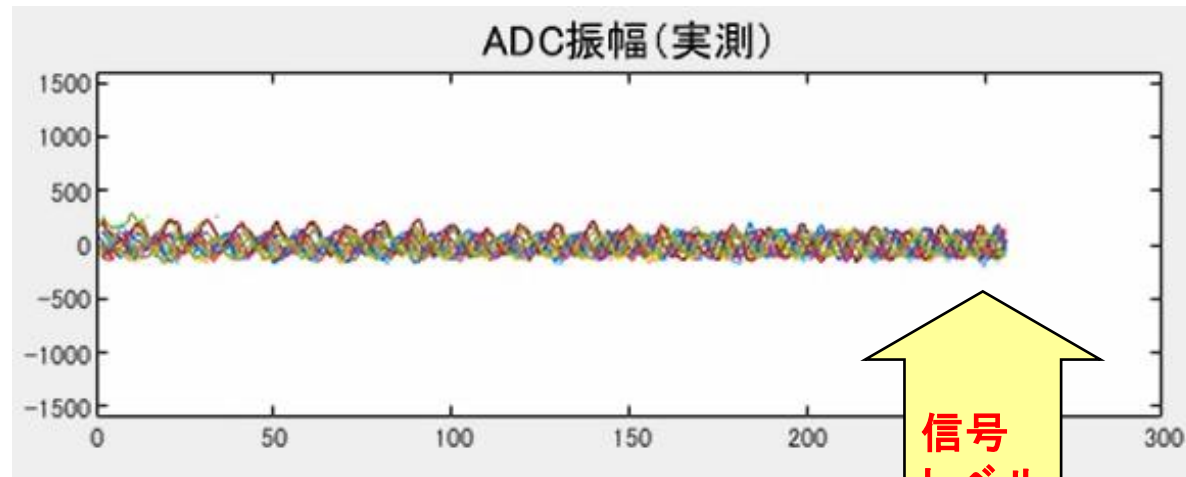
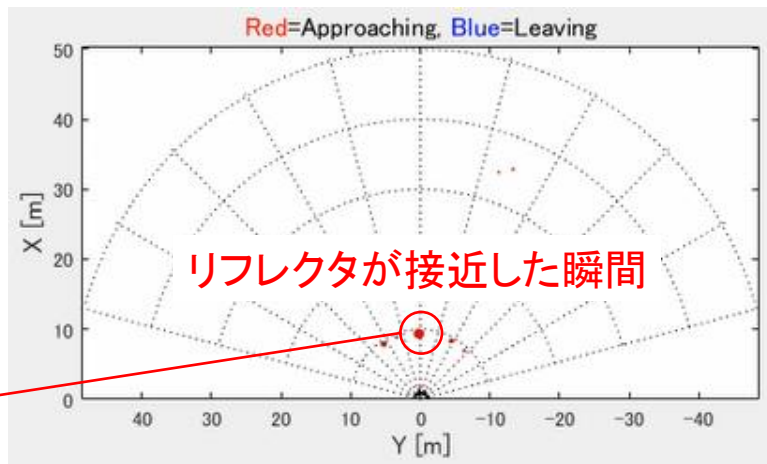
最終のレーダ画像

途中のADC値

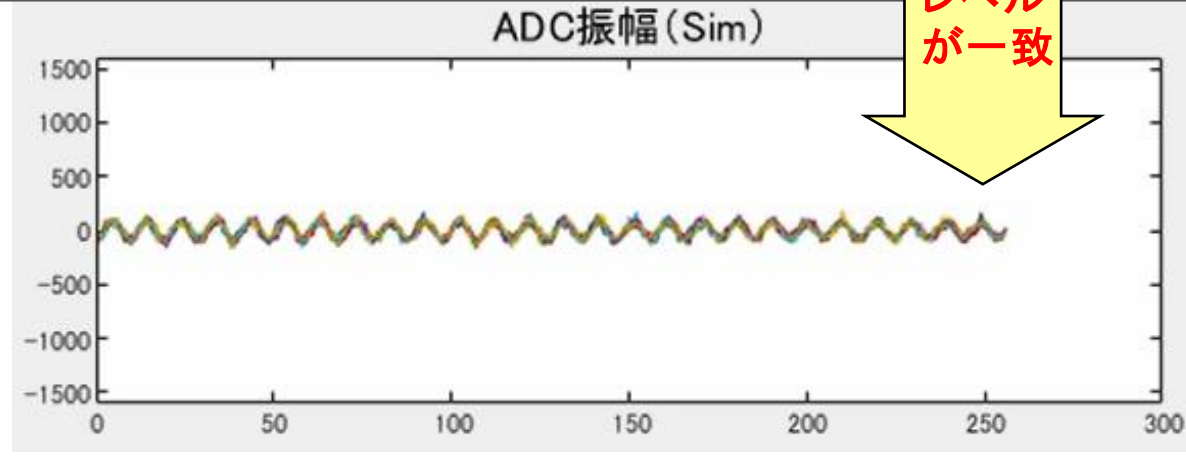
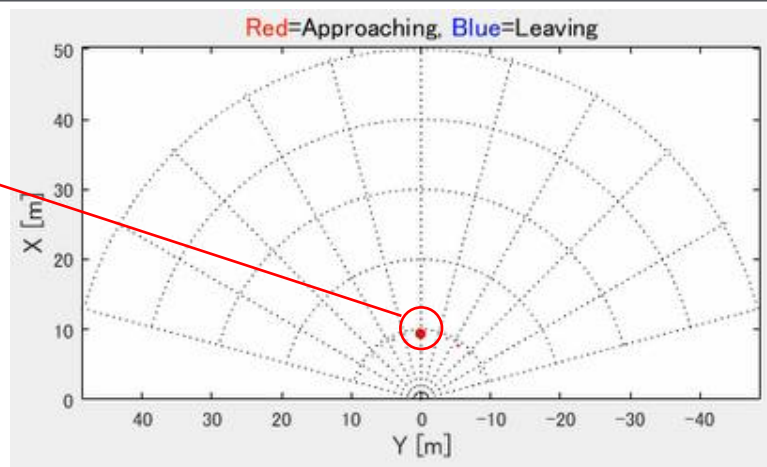
# 実測との比較は、最終のレーダ画像だけでなく、途中のADC値でも実施（2）



実測



Sim

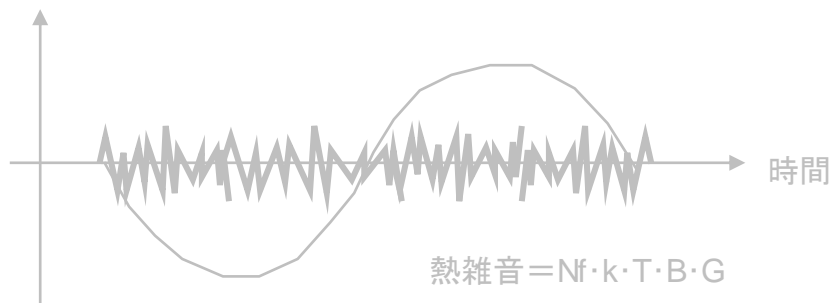


最終のレーダ画像

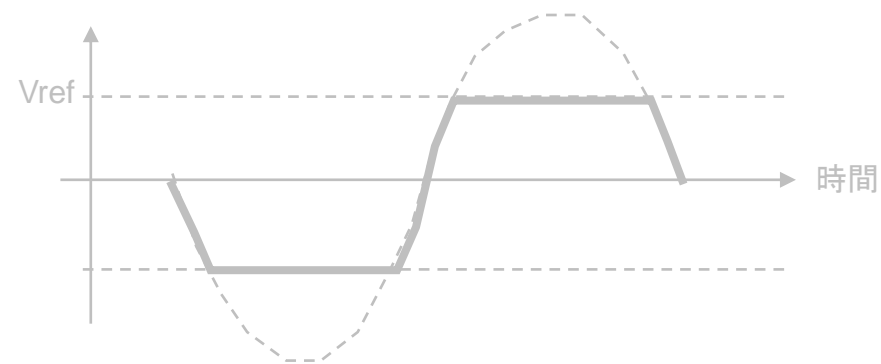
途中のADC値

# 現実の電子回路の不完全さを、可能な限りモデルに取り込んだ。

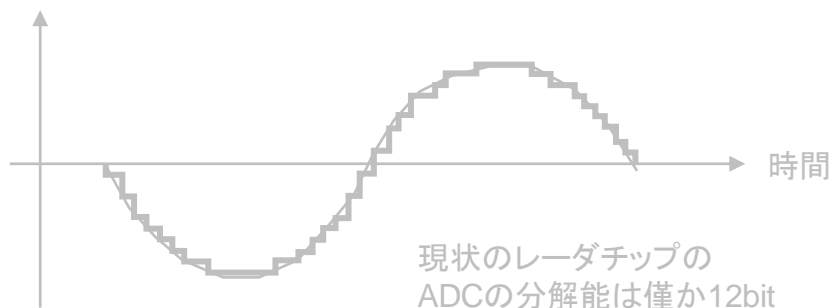
## ① 熱雑音の混入



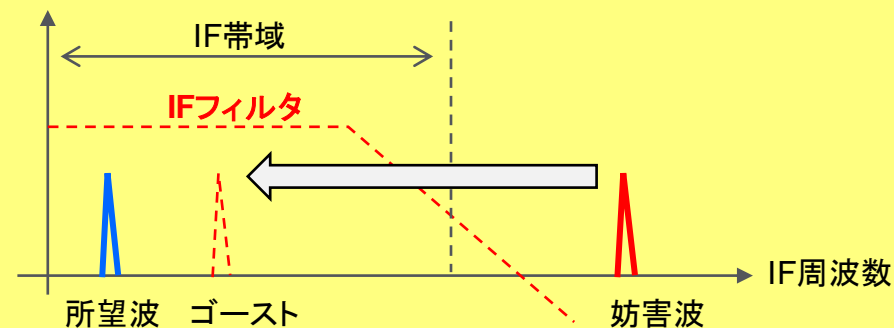
## ③ 過大入力時の、飽和クリッピングによる歪み



## ② 量子化雑音の混入

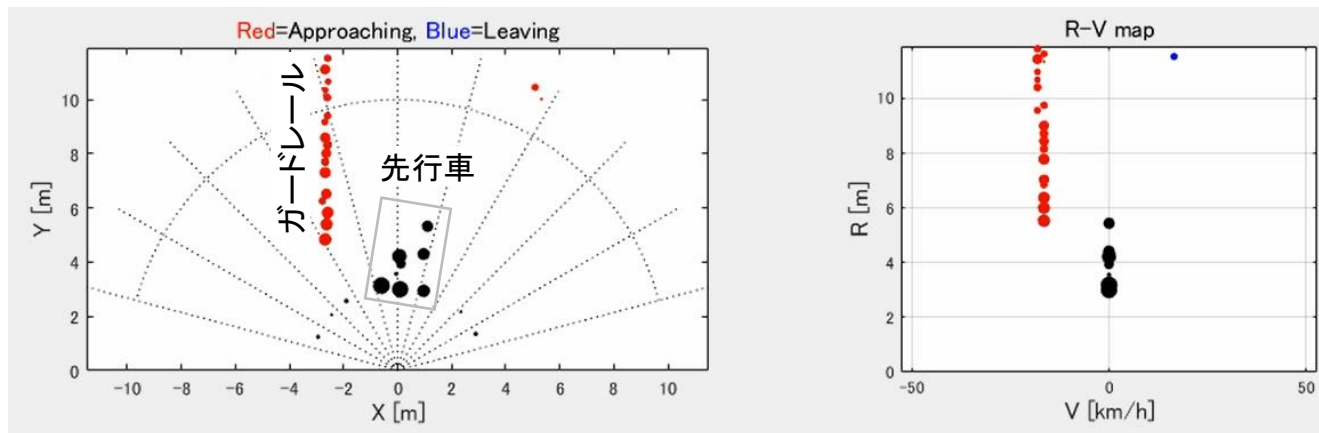
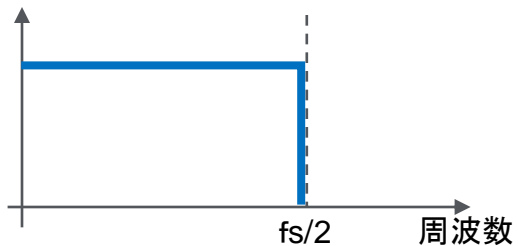


## ④ 不完全なアンチ・エイリアス・フィルタ (IFフィルタ) による、折り返しゴースト

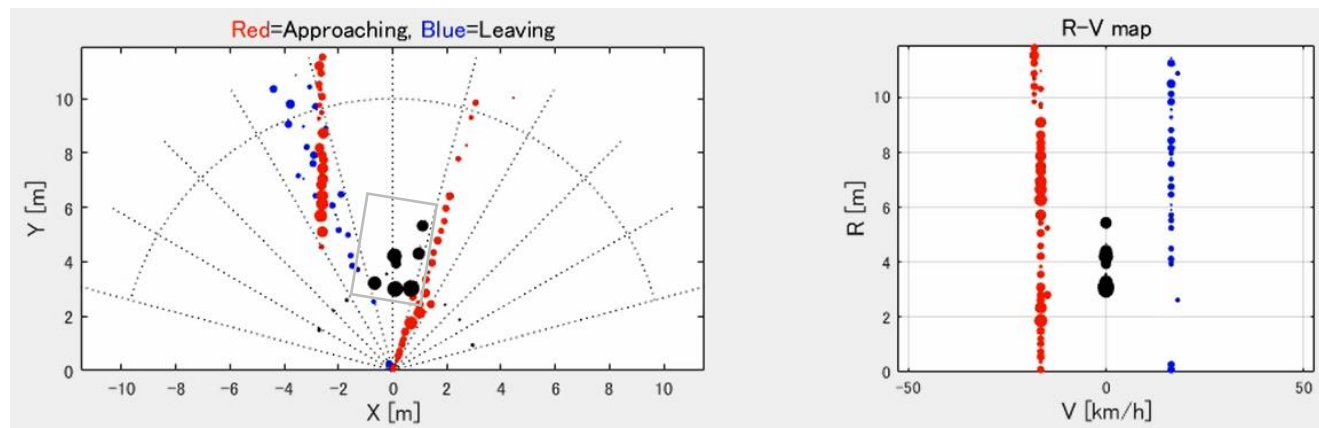
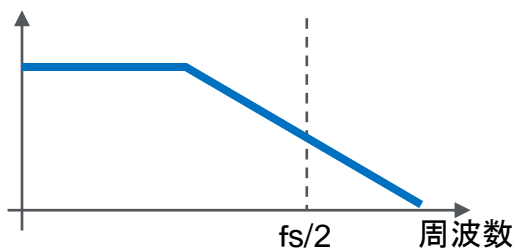


# IFフィルタの不完全さの影響の例 (※現実世界では検討できず、仮想世界だけで検討できる。)

理想的な矩形のIFフィルタを与えた場合



現実世界の不完全なIFフィルタを与えた場合



数値テーブルによって  
任意のグラフを設定可能。

様々なゴーストが発生



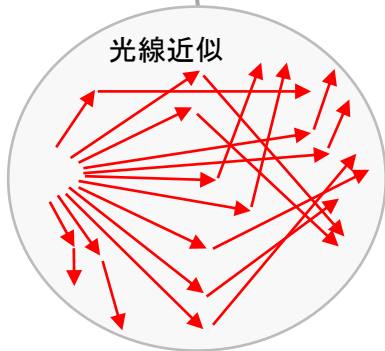
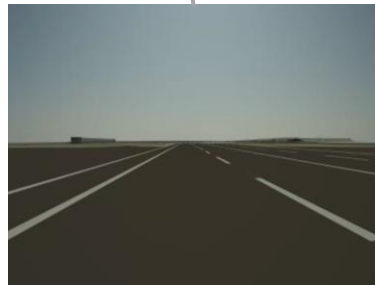
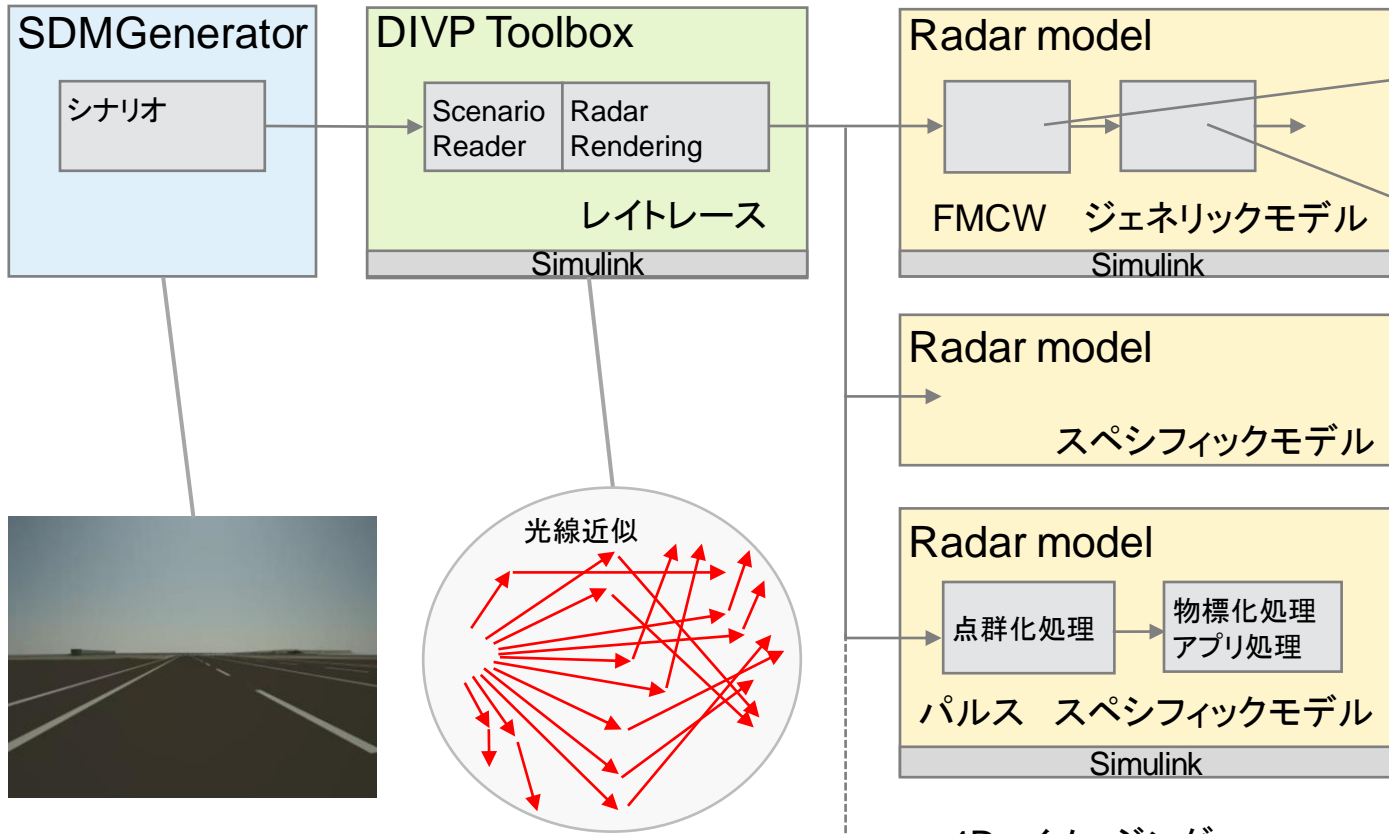
# Agenda

---

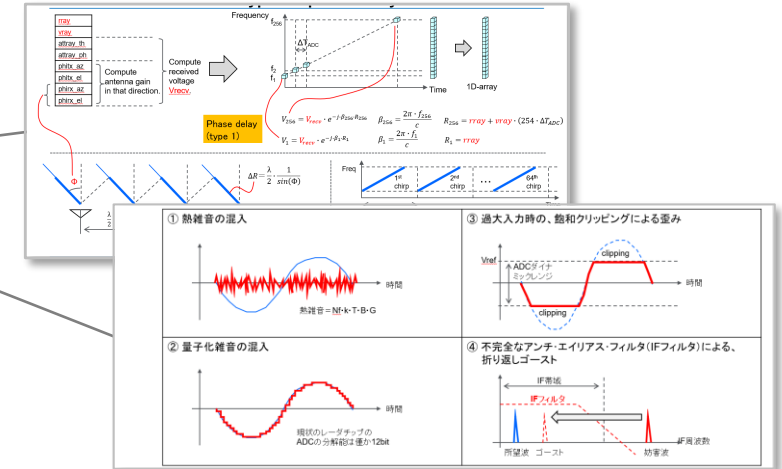
1	Radar空間モデルと、Radarセンサモデルを、接続する原理
2	Radarセンサモデルに組み込んだ、現実の回路の不完全さ
3	Radarセンサモデルを用いた、マルチパスシミュレーション
4	Radarセンサの相対速度検出を活かしたアプリケーション
5	まとめ

# DIVPシミュレータとレーダモデルの接続

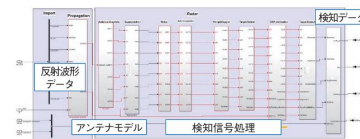
ユースケースに応じ、様々なタイプのレーダのシミュレーションが可能



4D、イメージング  
デジタルレーダ...



古河電工 FAS



以下、古河電工/古河ASのレーダモデルのシミュレーション事例に関してのご紹介

# 古河電工のレーダとそのモデル

## 24GHz周辺監視レーダ製品

新型周辺監視レーダ「MMR2」を開発、量産開始

～マツダ新型クロスオーバーSUV「MAZDA CX-60」に採用～

古河電工プレスリリース[1]

2022年4月12日

古河電気工業株式会社  
古河AS株式会社

- 準ミリ波レーダの特長を継承し、従来よりも高度な周辺監視アプリケーションに対応
- 30%の小型軽量化により、車両デザインや材質への配慮が最小限に
- 自動車の機能安全やサイバーセキュリティに関する国際規格に適合

古河電工グループの古河AS株式会社(本社:滋賀県犬上郡、代表取締役社長:阿部茂信)は、次世代自動車に求められる先進運転支援システム(ADAS:Advanced Driver Assistance System)で必須となる「周辺監視レーダ」において、従来品よりも大幅に性能を向上させた新型モデル「MMR2」を開発し、本年4月に日本で公開した新型クロスオーバーSUV「MAZDA CX-60」向けに量産を開始しました。



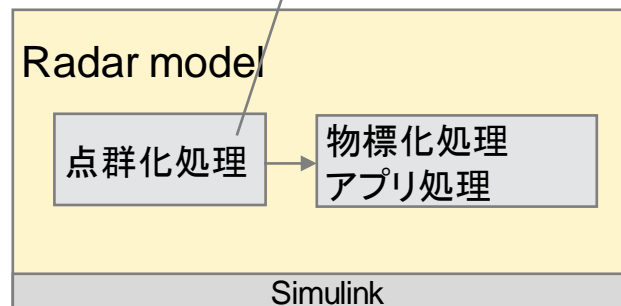
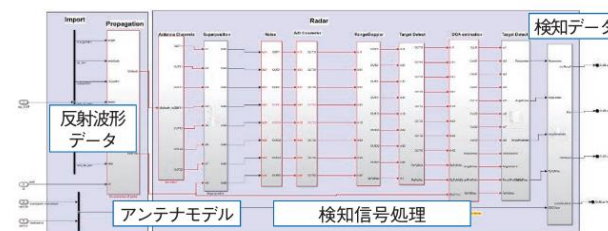
実機



モデル化

## レーダモデルを用いた仮想検証

膨大な実機検証において、  
自社レーダモデルを活用し  
検証の仮想化を進めている



古河電工技術報告[2]

4.2 仮想試験の取り組み  
シナリオの再現性、微妙な位置関係の影響などを調査するためには実際の評価だけでなく、シミュレーションを活用した仮想試験も重要である。MMR2においては、このシミュレーション環境で動作するレーダモデルを開発している(図16)。

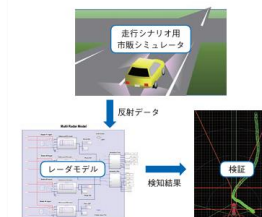
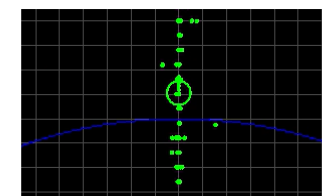


図16 シミュレーション開発フロー  
Simulation development flow.

古河電工時報第142号(令和5年2月) 20

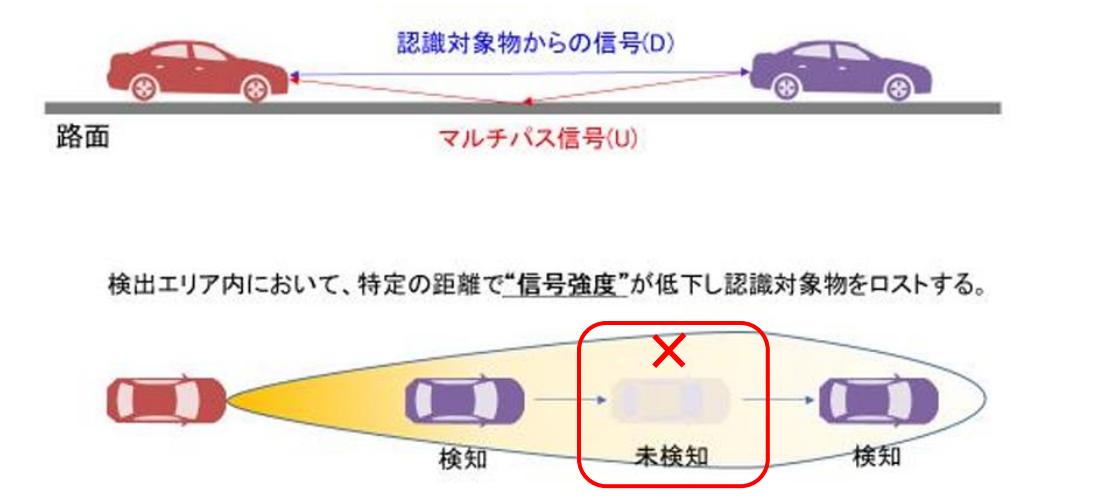


点群、物標、アプリケーション、各々のレベルにて  
実機を模したシミュレーションが可能

# 精緻なマルチパスシミュレーションの実例

## レーダにおけるマルチパス課題

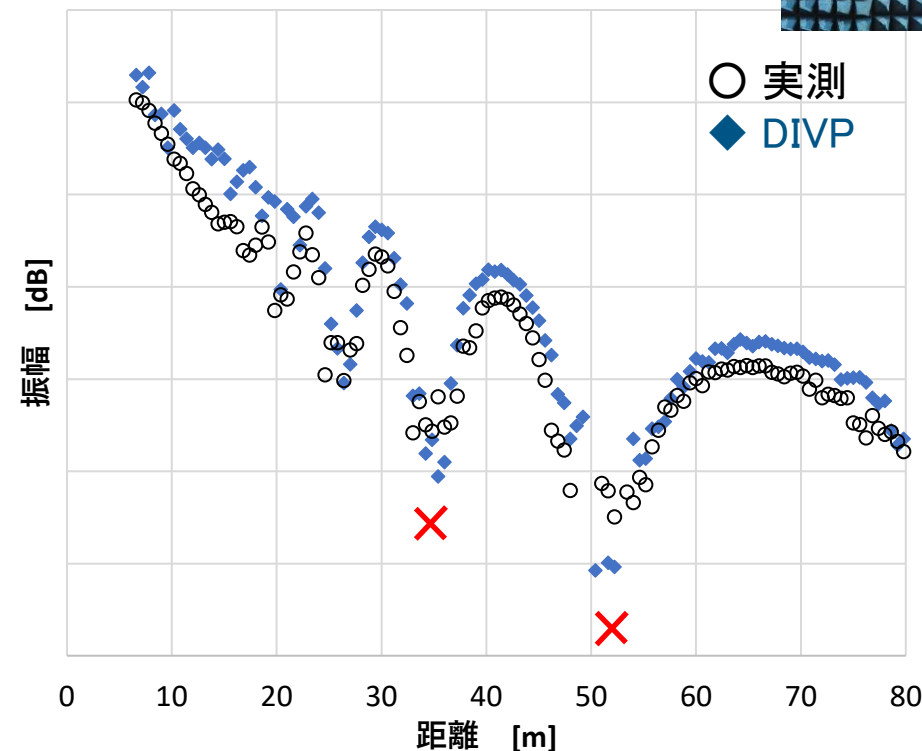
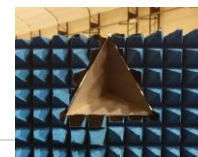
自動運転の安全性評価フレームワーク Ver 3.0 [3] より



未検知となりうる課題とされている  
センサ限界を把握できることが安全性検証において必要

SIP -adus SIP自動運転の成果とその先へ [4] より

## シミュレーション実例 局所的な振幅減衰が発生→未検知

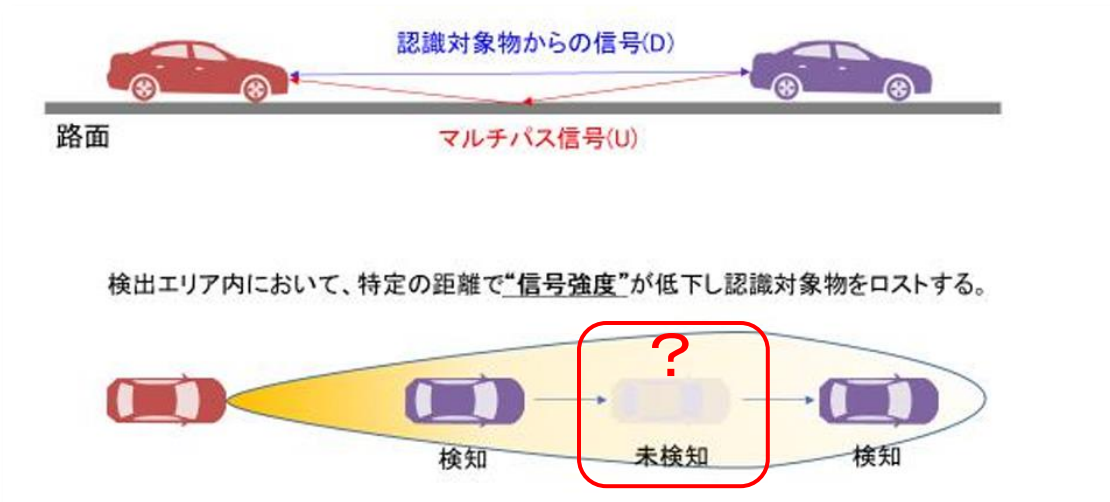


DIVPシミュレータであれば、正確な想定が可能

# マルチパスシミュレーションはそれほど難しくない？

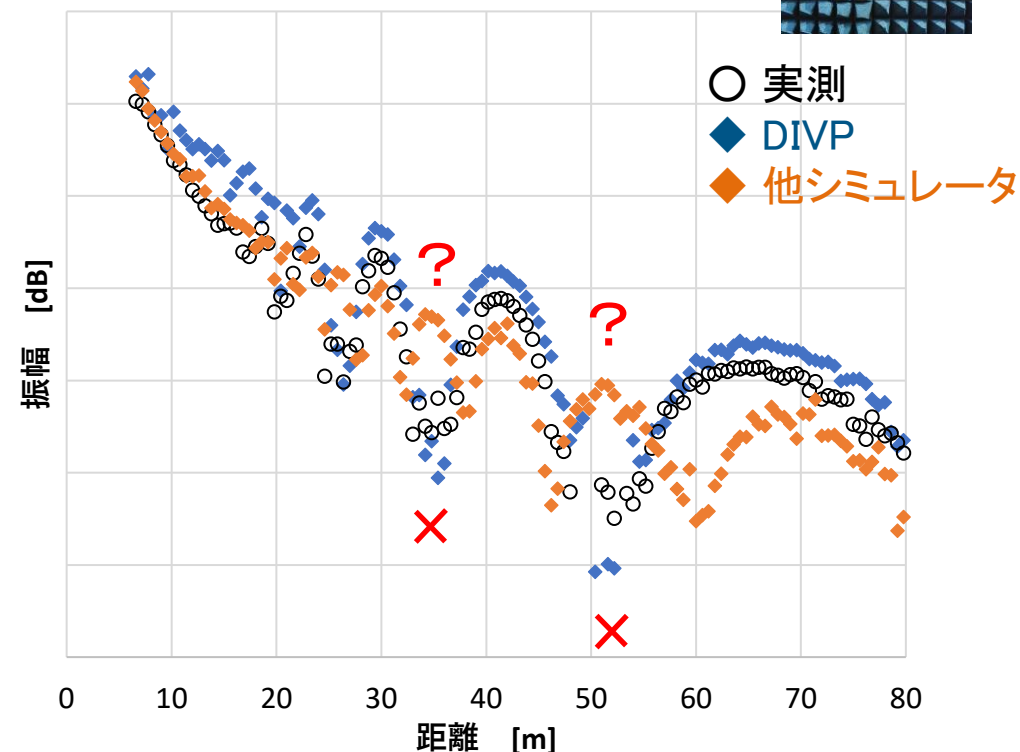
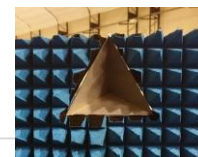
## レーダにおけるマルチパス課題

自動運転の安全性評価フレームワーク Ver 3.0 [3] より



未検知となりうる課題はある、ない？  
センサ限界を把握できることが安全性検証において必要

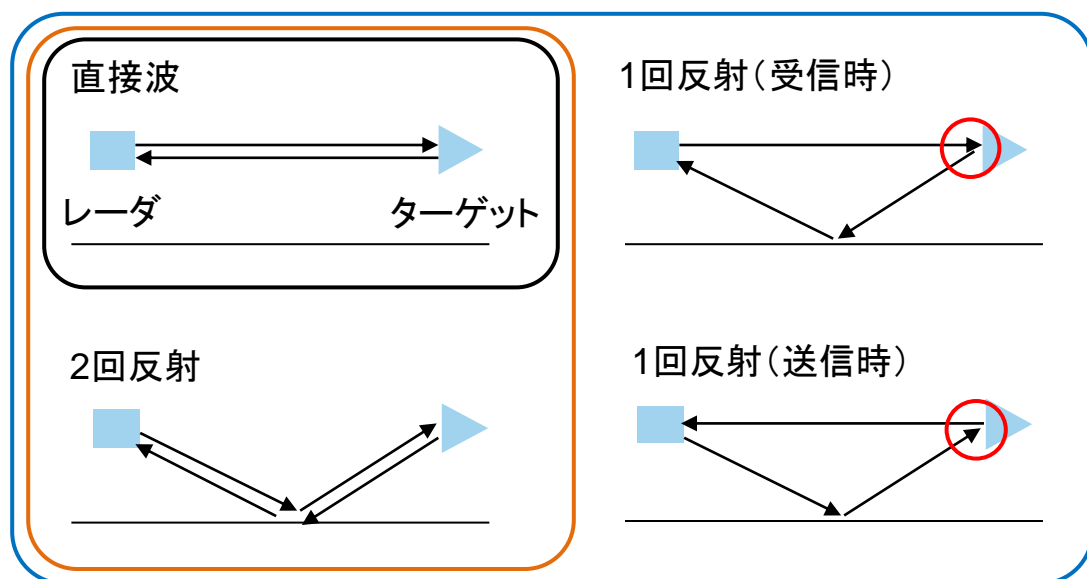
## シミュレーション実例 局所的な振幅減衰が発生しない？



正確なシミュレーションは当たり前ではない

# DIVPシミュレータにおいて、正確なマルチパスが計算可能である理由

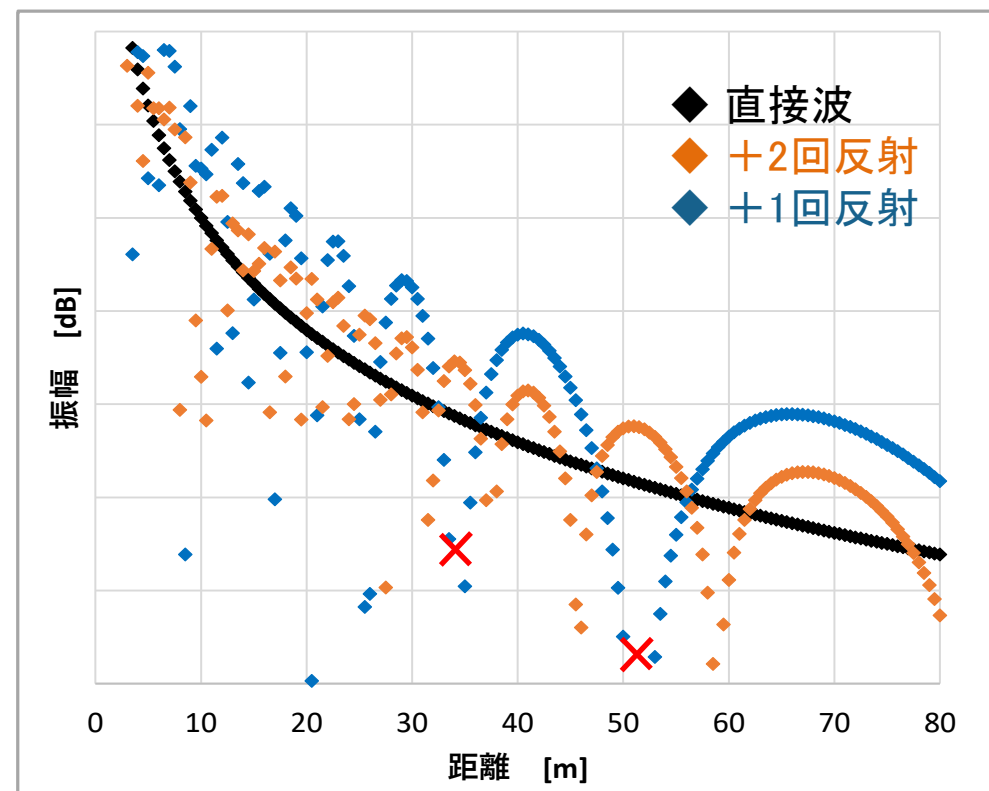
## レーダにおけるマルチパス現象の理解



DIVPシミュレータでは、ターゲットにおいて入射角  $\neq$  出射角の条件を含んだレイ計算もされる模様  
(幾何光学: 入射角 = 出射角 物理光学: 入射角  $\neq$  出射角も含む)

全ての現象を考慮することで  
正確なシミュレーションを可能としている

## マルチパス理論計算



# Agenda

---

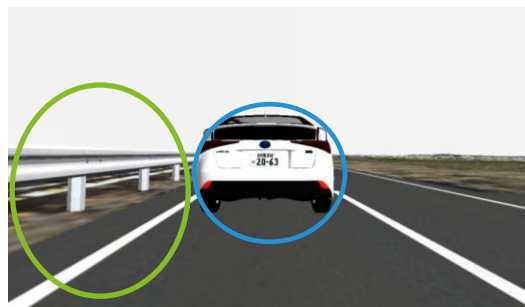
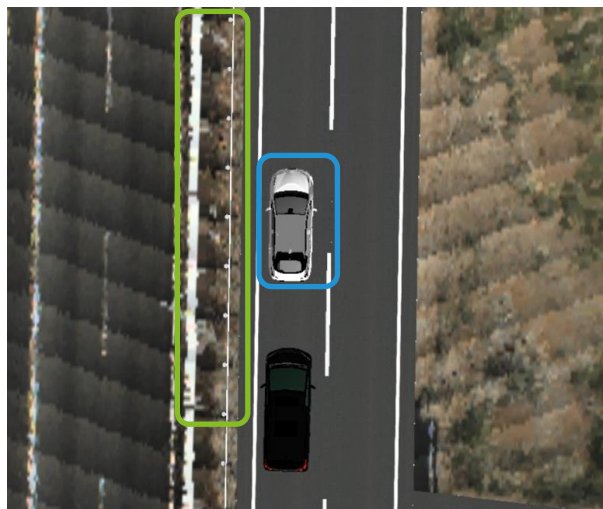
1	Radar空間モデルと、Radarセンサモデルを、接続する原理
2	Radarセンサモデルに組み込んだ、現実の回路の不完全さ
3	Radarセンサモデルを用いた、マルチパスシミュレーション
4	Radarセンサの相対速度検出を活かしたアプリケーション
5	まとめ

# レーダの相対速度検出を利用したアプリケーションの実例イメージ

## シナリオ、シミュレーション

ガードレール = 地上静止物

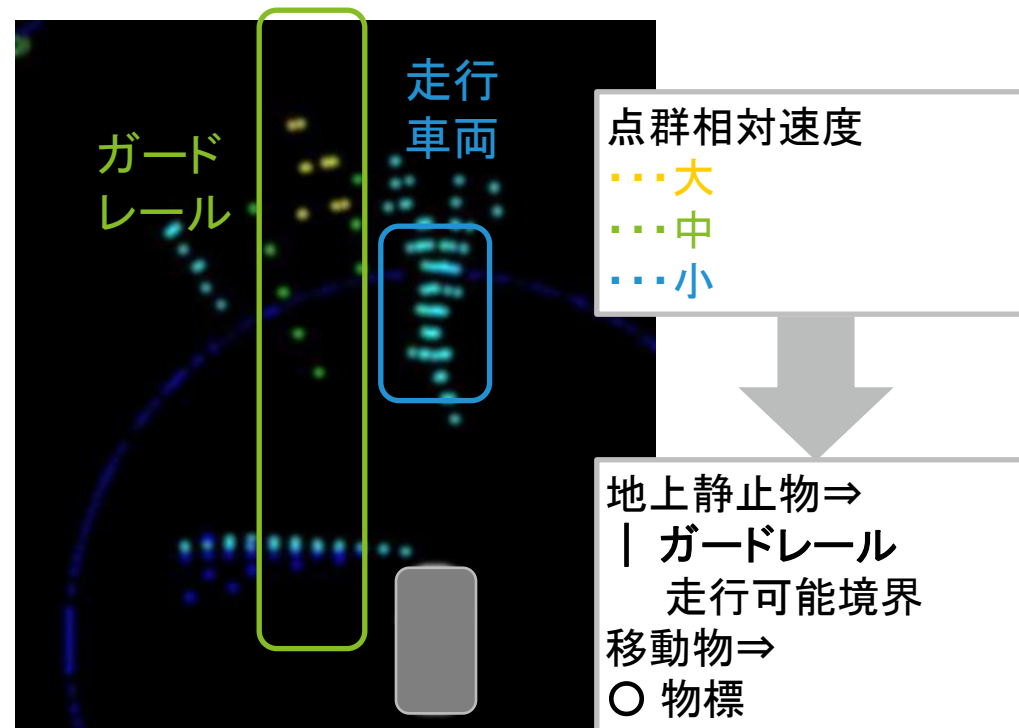
走行車両 = 移動物標



## レーダモデルにおける処理

点群出力にて異なる相対速度を検出

SIM



信号処理にて周辺環境の区別が可能



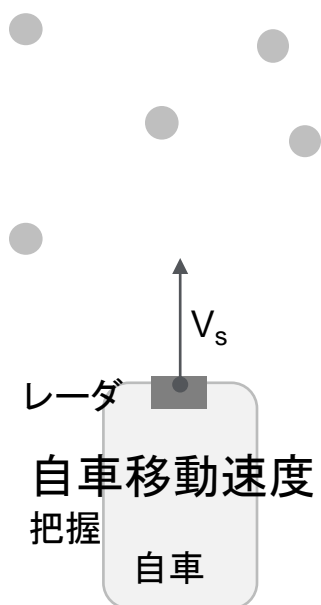
# レーダの相対速度検出と、他の情報を利用した処理の事例

## 地上静止物と物標の区別

- 地上静止物 = 走行可能境界(=フリースペース)や自己位置推定等への活用物標
- 物標 = 動く障害物として認識必要

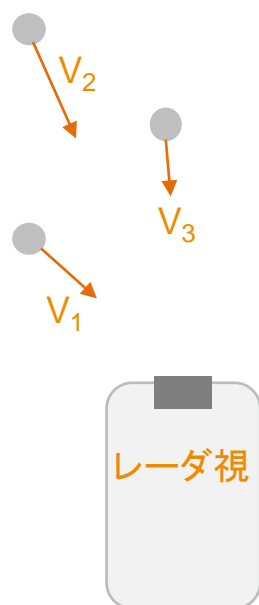
### 点群

地上静止物？物標候補？  
この時点で不明



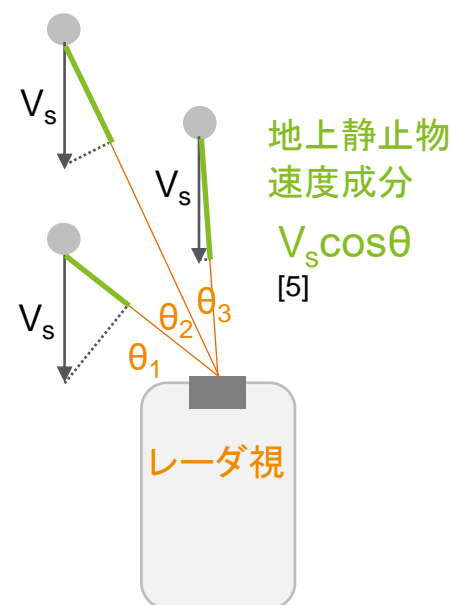
### + 相対速度情報

レーダにて相対速度検出

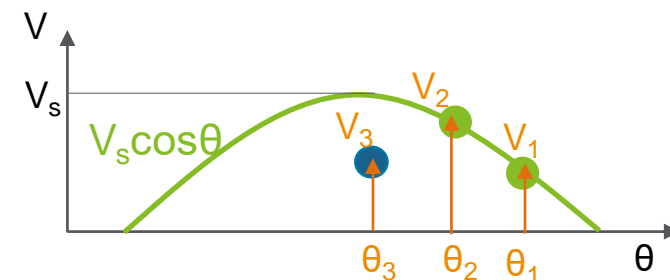


### + 角度情報

レーダにて角度検出  
自転車移動相当の速度抽出



- 相対速度  $V = V_s \cos\theta$   
→ 地上静止物
- 相対速度  $V \neq V_s \cos\theta$   
→ 物標候補



自転車移動速度と  
レーダの速度と角度の情報より  
地上静止物と物標の区別が可能

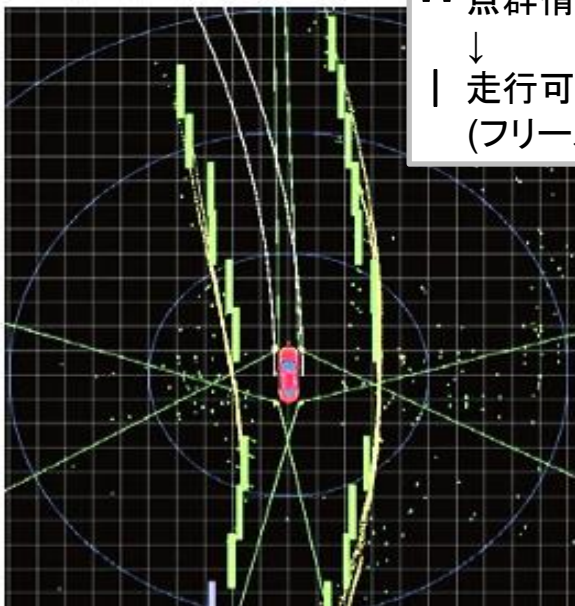
# freespace detection, object detection application simulation verification

## 地上静止物を区別し freespace detection

### ガードレール等の形状認識機能 [2]

地上静止物とみなした点群情報をもとに  
信号処理によって走行境界算出

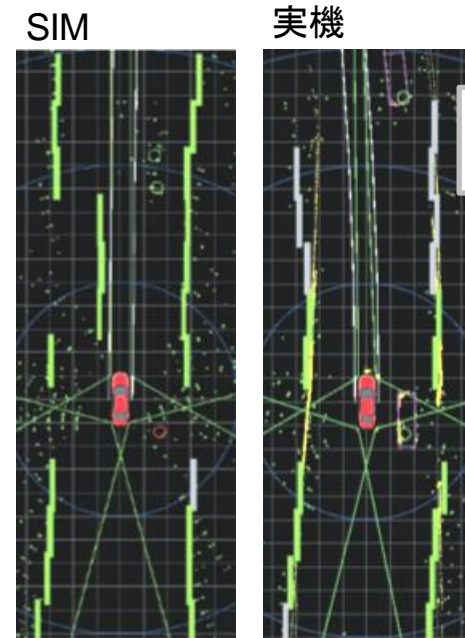
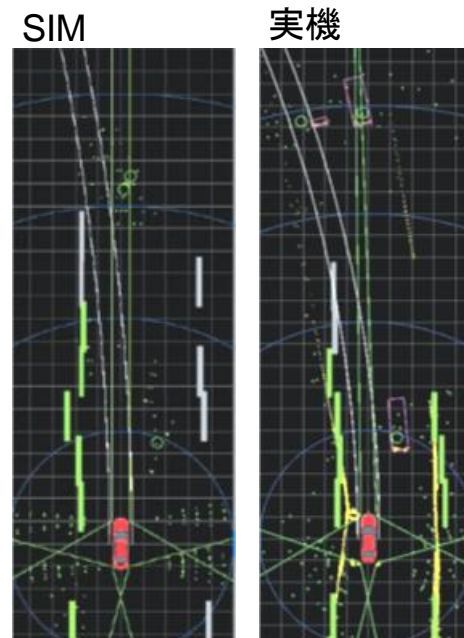
実機例



点群情報  
↓  
走行可能境界  
( freespace)

## シミュレーションによる検証

SIP -adus SIP自動運転の成果とその先へ [4] より



freespace  
○移動物標

アプリケーションの  
傾向に関して  
シミュレーションで  
の分析等が可能

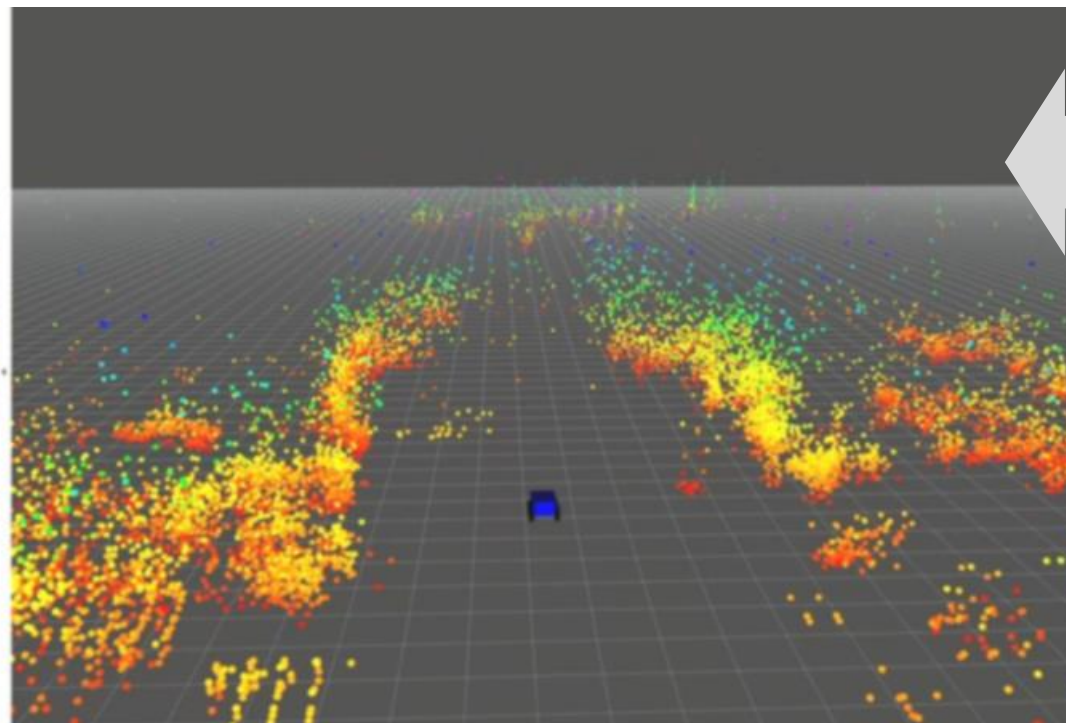
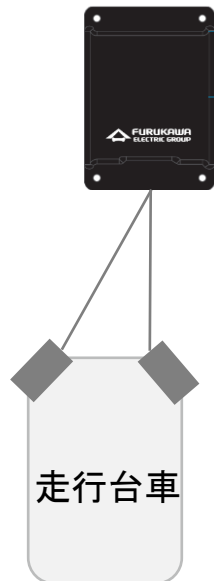
# 今後の freespace 検知の高度化も含めた、4D化するレーダ

## 4Dレーダ化、高さ情報の付加による周辺検知の詳細化

### 地上静止物の詳細化

#### 実機評価例

当社  
研究品  
レーダ



SIM

比較  
検証

モデル構築中

4D点群シミュレーションにて、  
実機に類する出力が可能であるか、今後検証を進める予定

# Agenda

---

1	Radar空間モデルと、Radarセンサモデルを、接続する原理
2	Radarセンサモデルに組み込んだ、現実の回路の不完全さ
3	Radarセンサモデルを用いた、マルチパスシミュレーション
4	Radarセンサの相対速度検出を活かしたアプリケーション
5	まとめ

# まとめ

---

- DIVP-PFのRadarセンサモデルの内部を、3つの観点から説明した。
  - レイトレーシング世界(線)と電磁波世界(平面波)の接続原理
  - 効率的なRadarcubeの計算原理
  - 現実の電子回路の不完全さをモデル化
- DIVP-PFに、任意にRadarセンサモデルを接続することで、様々なタイプのRadarのシミュレーションや、様々なセンサ出力の評価が可能。
- レーダ課題であるマルチパス現象にて、点群振幅レベルにて正確なシミュレーションが可能である事例を示した。レーダの速度検出を活用した、地上静止物と物標に切り分けるアプリケーションと、そのシミュレーション事例を示した。
- 今後、4D化したRadarセンサにおけるシミュレーションの実施をすすめる。



*Thank you for your kind attention!*

*Tokyo Odaiba → Virtual Community Ground*

**END**



# 参考文献

---

- [1] プレスリリース [https://www.furukawa.co.jp/release/2022/mobi\\_20220412.html](https://www.furukawa.co.jp/release/2022/mobi_20220412.html)
- [2] 技術報告 [https://www.furukawa.co.jp/rd/review/fj142/fj142\\_06.pdf](https://www.furukawa.co.jp/rd/review/fj142/fj142_06.pdf)
- [3] 自動運転の安全性評価フレームワーク Ver 3.0 [https://www.jama.or.jp/operation/safety/automated\\_driving/pdf/framework\\_ver\\_3\\_0.pdf](https://www.jama.or.jp/operation/safety/automated_driving/pdf/framework_ver_3_0.pdf)
- [4] SIP -adus SIP自動運転の成果とその先へ <https://www.sip-adus.go.jp/exhibition/c2.html>
- [5] 自動車用ミリ波レーダにおけるエイミング誤差の推定 [https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejias/125/3/125\\_3\\_286/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejias/125/3/125_3_286/_pdf)