

「ミリ波レーダの原理、特徴、電波法」

発表者プロフィール



神奈川工科大学
KANAGAWA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

■ 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。自動車業界に来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、現実世界のミリ波レーダ技術者から、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 電気系学科卒
- 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。



神奈川工科大学
KANAGAWA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

■ 黒田 浩司

■ kuroda02@cco.kanagawa-it.ac.jp

長年、自動車エレクトロニクス分野に携わり、1990年代後半から車載ミリ波レーダの研究開発に従事してきました

その間79GHz帯周波数を車載ミリ波レーダへ割り当てるための技術検討作業にも参加しています

これまでの経験と知見をDIVPプロジェクトに活用することを目指しています

経歴

- 大学卒業後、日立製作所 日立研究所へ入社 自動車用ナビゲーションシステム、予防安全システム他を開発。
- 2004年～ 日立製作所 自動車機器事業部にて、車載ミリ波レーダを開発。
- 2009年日立オートモティブシステムズ(株)設立に伴い異動
2021年日立Astemo(株)設立に伴い異動
- 2024年4月～ 神奈川工科大でDIVPプロジェクトに参加



ミリ波レーダの原理、特徴、電波法

神奈川工科大学
特任研究員 天野、黒田

Weather Forecast



AD safety Assurance



For Validation & Verification Methodology

*AD : Automated driving

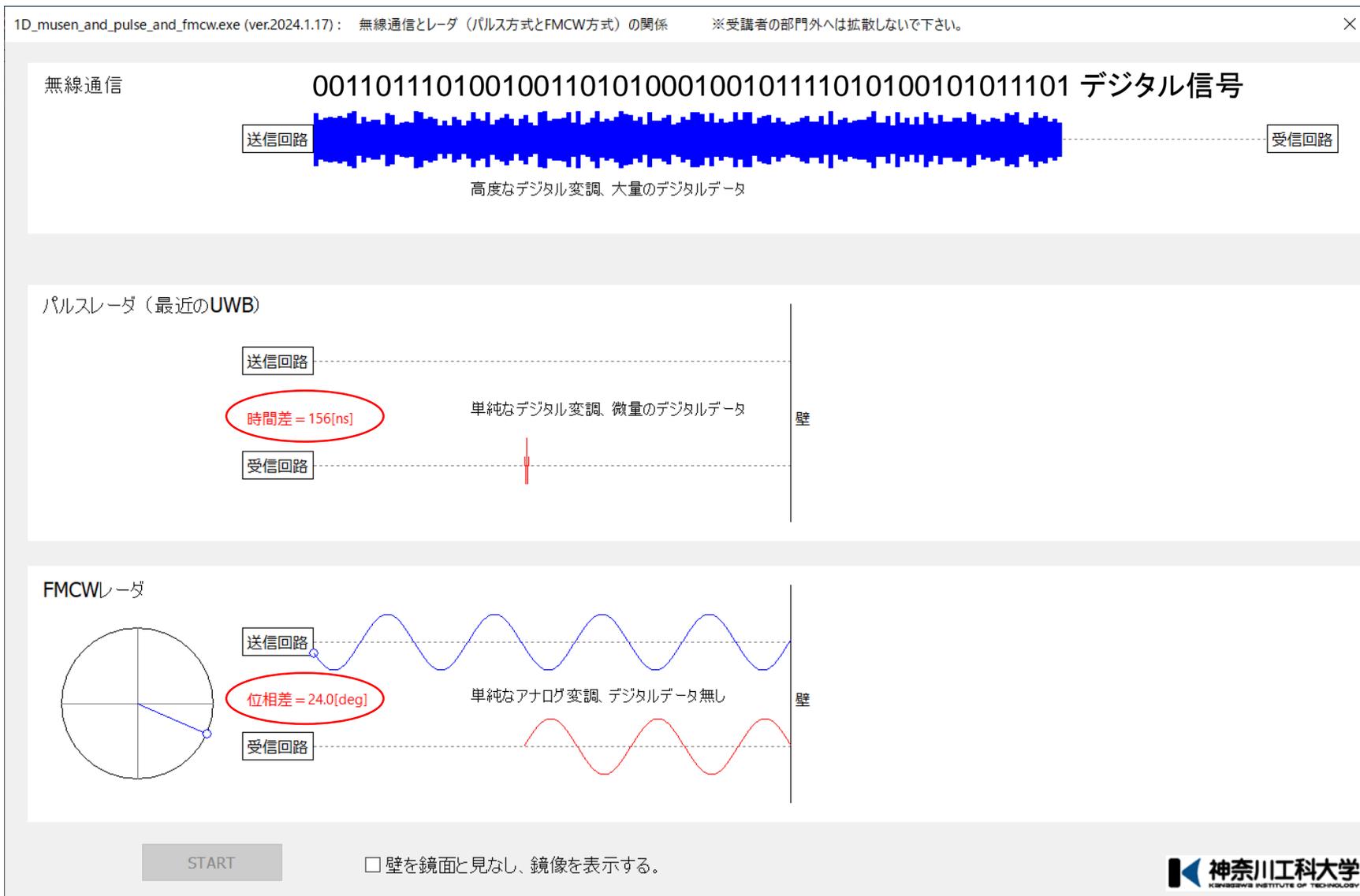
Agenda

- 1 1次元 Radarの原理（距離方向）
- 2 2次元 Radarの原理（方位方向）
- 3 Radarの特徴、特にLiDARとの比較
- 4 Radarの電波法
- 5 まとめ

Agenda

1	1次元 Radarの原理（距離方向）
2	2次元 Radarの原理（方位方向）
3	Radarの特徴、特にLiDARとの比較
4	Radarの電波法
5	まとめ

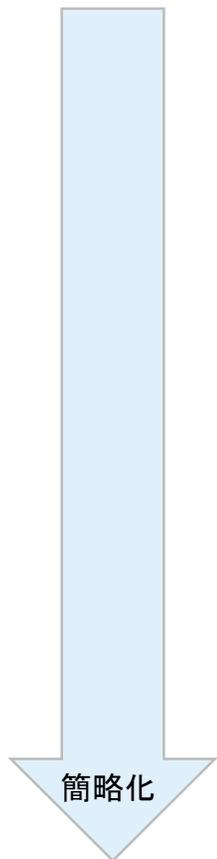
空中を飛ぶ電波のイメージ



車載レーダではこれが主流。
人間の脳は「位相」で
考えるのに慣れてないため、
理解が難しい。



簡略化して眺めれば、レーダの基本原理は とても単純。



これが、
FMCWレーダの基本である、
「ドップラーレーダ」の原理



1D_doppler_simple_model (ver.2024.01.21) : 位相差を手抜きで計算できる簡略化モデル ※受講者の部門外へは拡散しないで下さい。

本物の物理現象

【簡略化Step1】 壁を鏡面と見なして無視し、鏡像だけを見る。

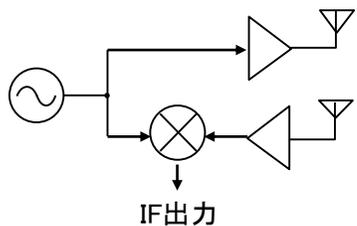
【簡略化Step2】 絶対位相ではなく位相差しか見ないので、送信波と受信波を同時に止めても変わらない。

距離 $2R$ の中に波長 λ が 8.86 個
従って位相差 = $-0.86 \text{ 個} \times 2\pi \text{ [rad]} = -308.57 \text{ [deg]} = 51.43 \text{ [deg]}$

位相差 = $-2\pi \frac{2 \cdot R}{\lambda}$

神奈川工科大学
KENNENKAU INSTITUTE OF TECHNOLOGY

車載レーダでは、「ドップラーレーダ」とは原理が双対な「測距レーダ」が使われる。



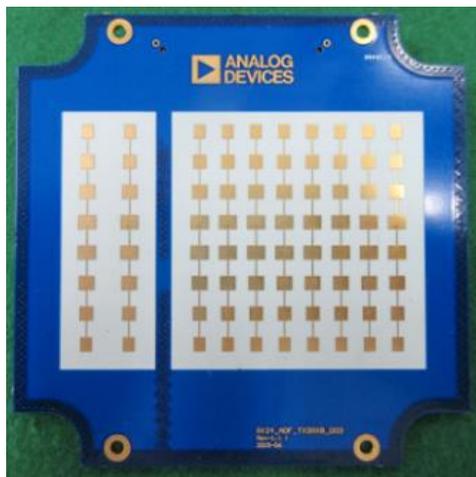
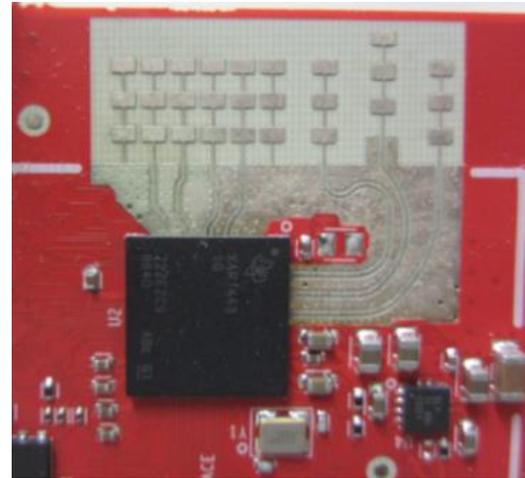
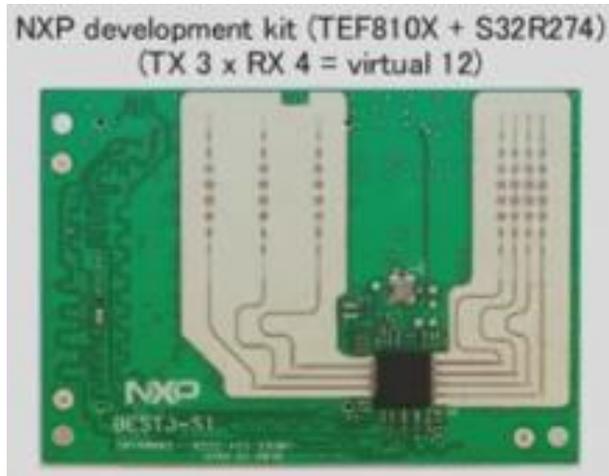
$$\text{位相差} = -2\pi \frac{2 \cdot R}{\lambda} = -4\pi \frac{R \cdot f}{c}$$

	距離 R を変化させると「ドップラーレーダ」	周波数 f を変化させると「測距レーダ」
ミリ波電波	<p>周波数</p> <p>無変調 CW</p> <p>時間</p>	<p>周波数</p> <p>チャープ変調波</p> <p>帯域幅</p> <p>周期 T</p> <p>時間</p>
IF信号 (時間波形)	<p>ADC値</p> <p>正弦波 $\cos(\text{位相差})$ or $\sin(\text{位相差})$</p> <p>時間</p>	<p>ADC値</p> <p>正弦波 $\cos(\text{位相差})$ or $\sin(\text{位相差})$</p> <p>時間</p>
IF信号 (スペクトル)	<p>反射</p> <p>速度 V に比例した周波数</p> <p>本来は周波数軸だが、速度軸として解釈する。</p>	<p>反射</p> <p>距離 R に比例した周波数</p> <p>本来は周波数軸だが、距離軸として解釈する。</p>

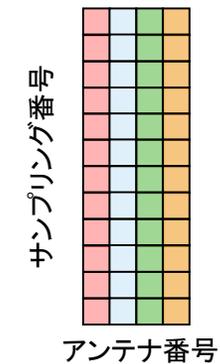
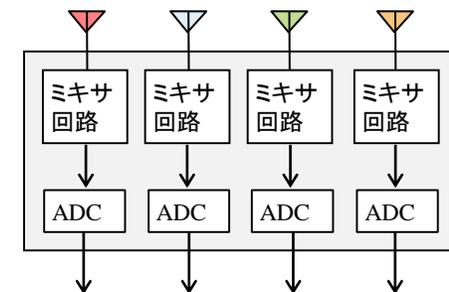
Agenda

1	1次元 Radarの原理（距離方向）
2	2次元 Radarの原理（方位方向）
3	Radarの特徴、特にLiDARとの比較
4	Radarの電波法
5	まとめ

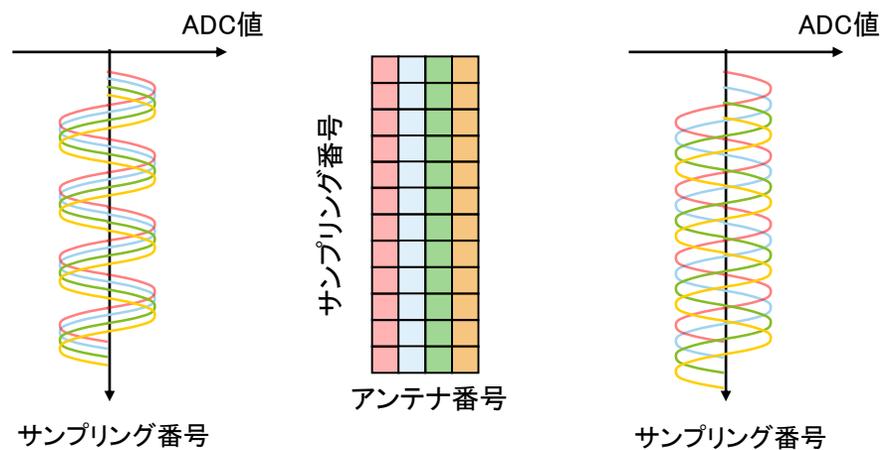
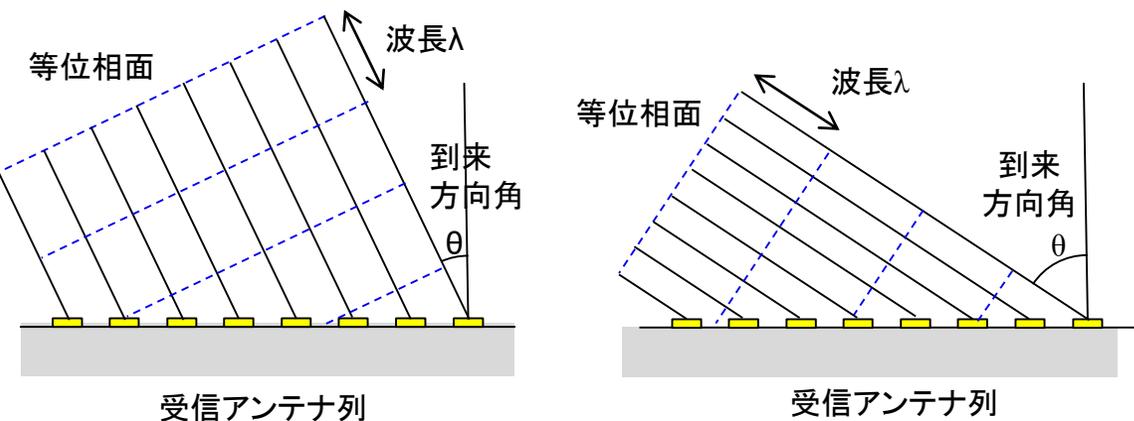
2次元レーダの特徴



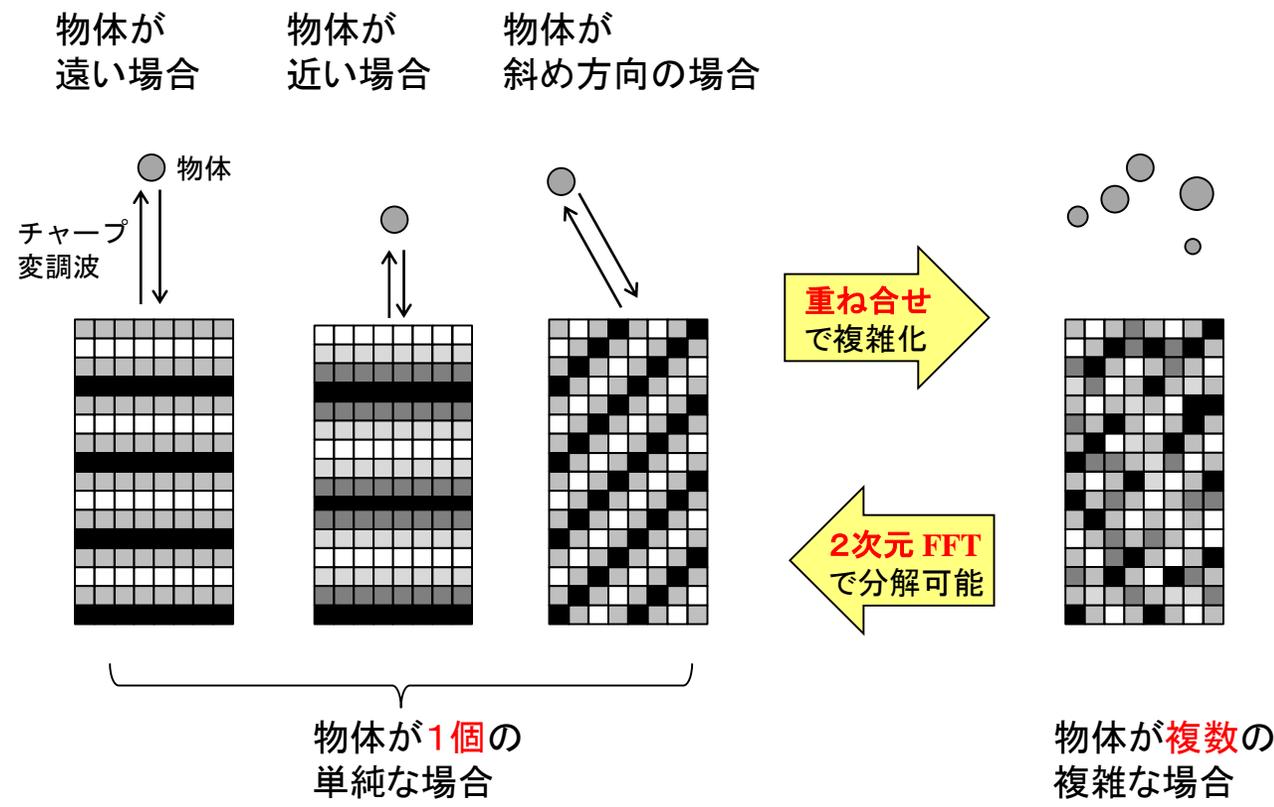
- アンテナ本数が多い。
- 中身は、1次元レーダを複数並べたものに過ぎない。
- ADC回路が複数あるため、2次元配列データが得られる。



物体の距離・方向を推定する原理



到来方向によって、位相の差が変化する。



前ページの原理 (=2次元配列の縞模様) を、動くプログラムで体感しよう。

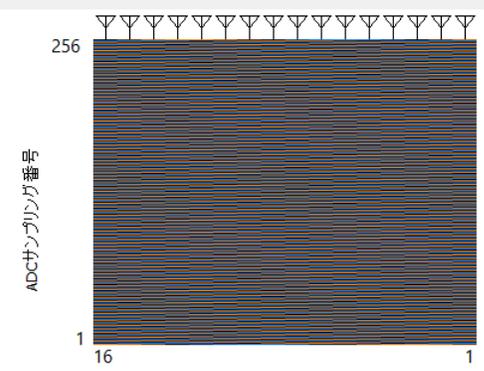
2D_array (ver.2024.01.21) : 2次元イメージングレーダ原理の体験ツール ※セミナー受講者の部門外へは拡散しないで下さい。

マウスで位置を指定下さい。物体1は左クリック、物体2は右クリック。

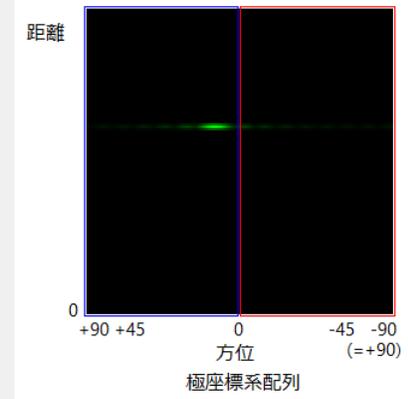


物体数
 1個
 2個

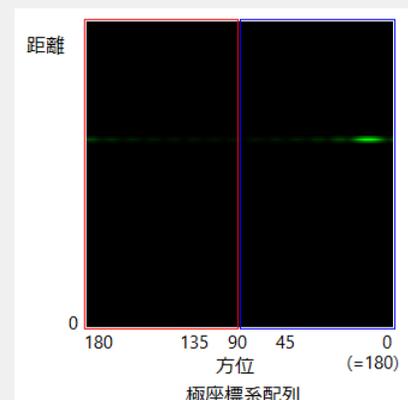
受信アンテナ本数
 4本
 8本
 16本
 32本



2次元FFT
Step1: 縦方向
Step2: 横方向



Step3: FFT shift
ゼロを左端から中央へ移動

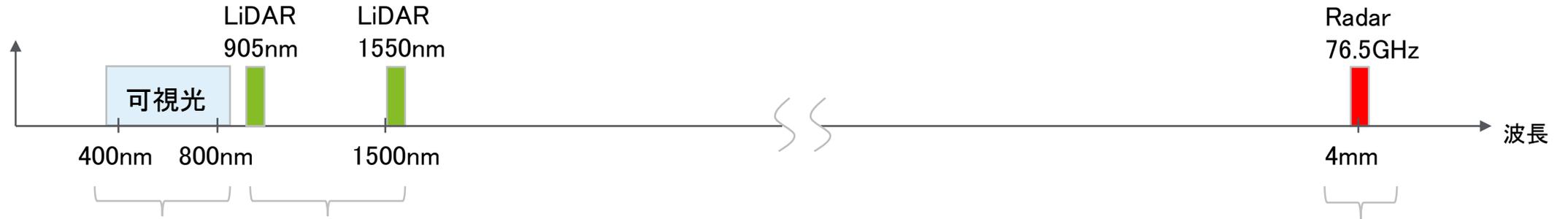


神奈川工科大学
KANAGAWA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Agenda

1	1次元 Radarの原理（距離方向）
2	2次元 Radarの原理（方位方向）
3	Radarの特徴、特にLiDARとの比較
4	Radarの電波法
5	まとめ

Camera・LiDAR・Radar は全て電磁波センサだが、波長はざっくり **0.5 : 1 : 4000**。



波長比はざっくり

0.5 : 1 : 4000

結果、しばしばこのような関係になる。
例) 次ページ ガラスの測定例

Camera から見た
物体の見え方

≒

LiDAR から見た
物体の見え方

≠

Radar から見た
物体の見え方

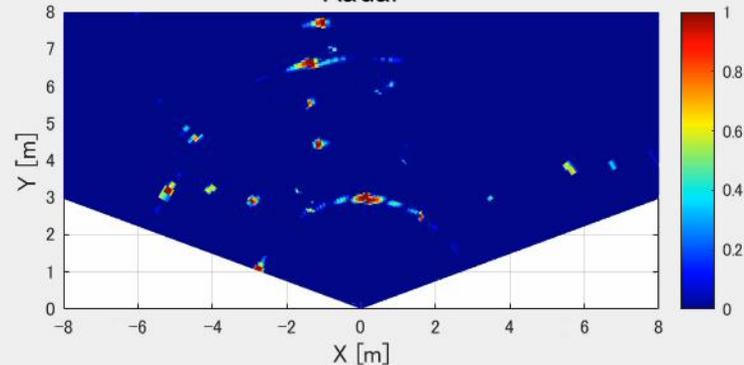
【LiDARに映らず、Radarに映る、身近な例】 ① ガラス

動画(51秒)

Camera

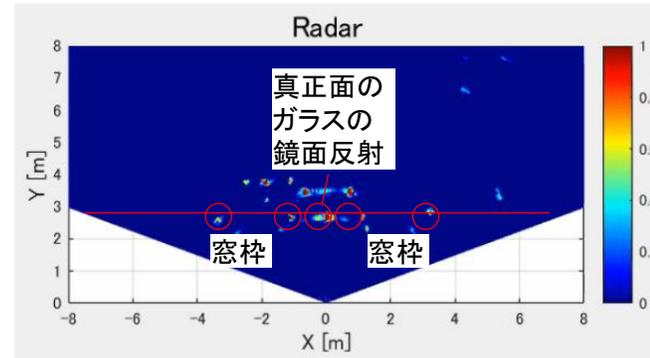


Radar

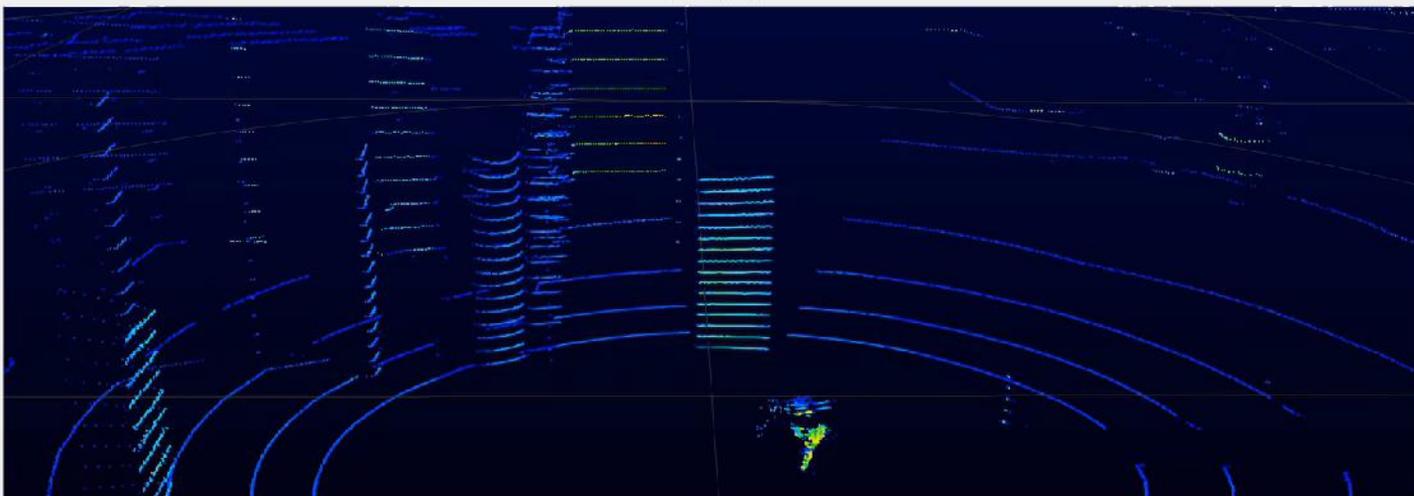


【Radar】

○ 映る。



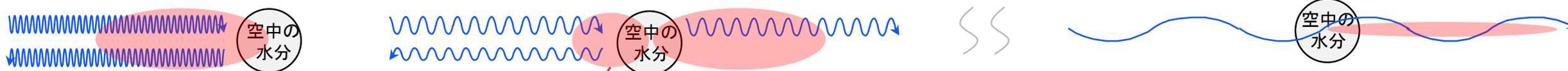
LiDAR



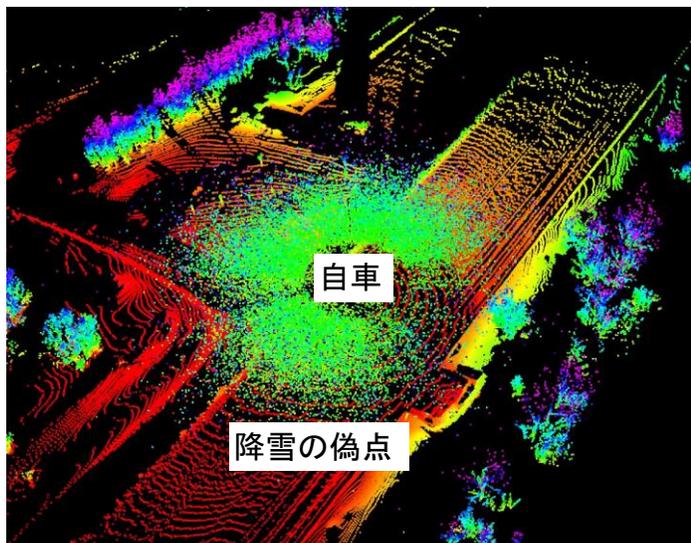
【LiDAR】

× 映らない。

4000倍の波長の差のため、LiDARは悪天候に弱い、Radarは強い。



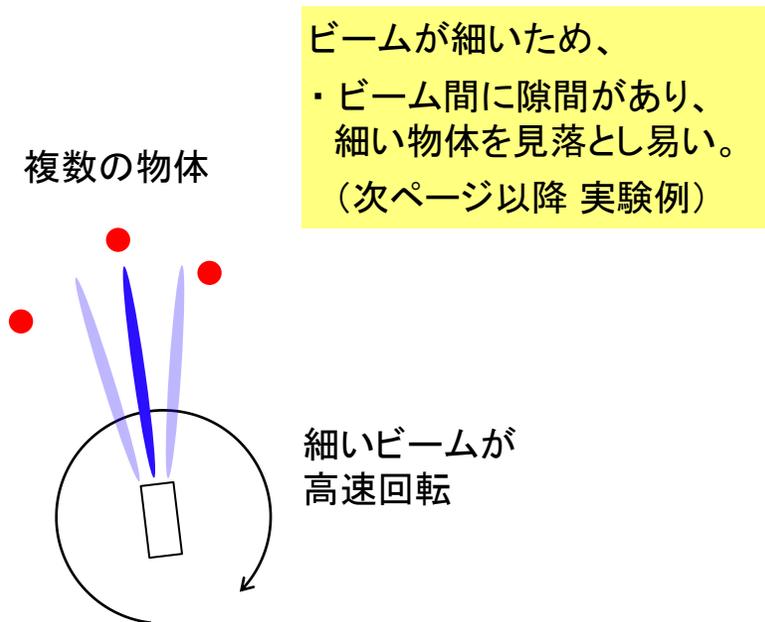
ミ-散乱による Back-scattering



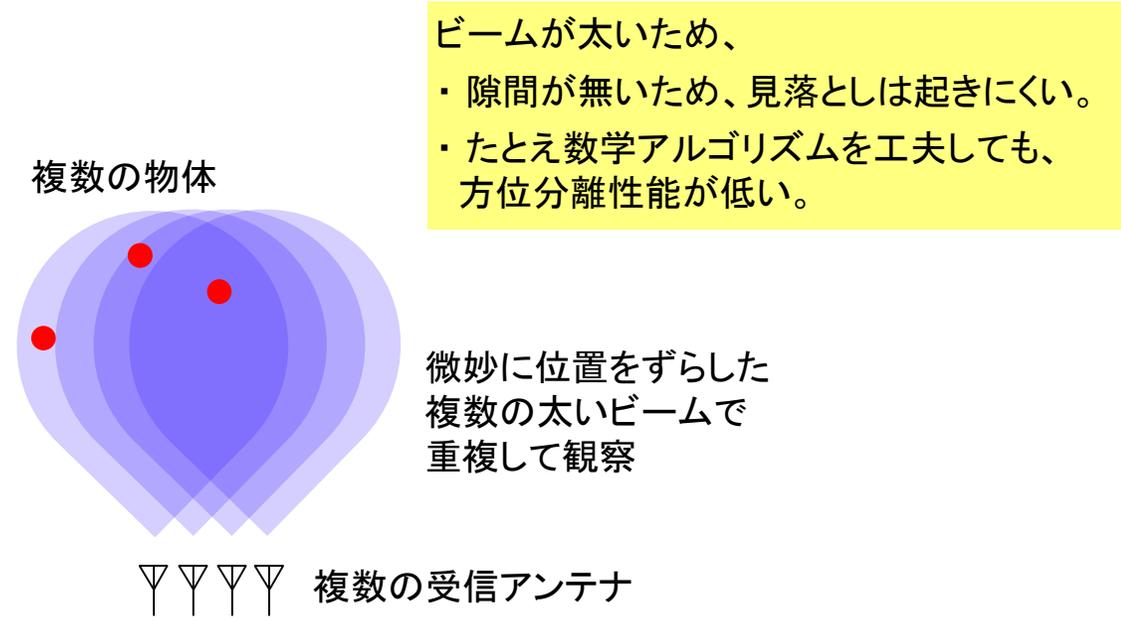
空中の水分 (雨・霧・雪) によって誤検出 (偽点) が発生し易い。

空中の水分によって反射しにくいいため、誤検出 (偽点) が発生しにくい。

波長が短いLiDARはビームを細くできる。波長が長いRadarはビームを細くできない。



LiDAR



Radar

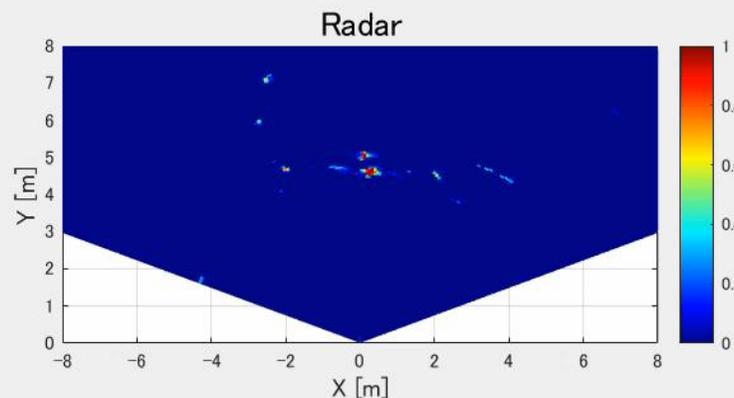
Rawデータの段階では複数物体が入り混じっており、そこから数学処理(※)を経て、ようやく物体を分離認識できる。

(※)直感的には連立一次方程式。実際はFFT。

$$\begin{cases} y_1 = a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \cdots + a_{1n} x_n + b_1 \\ y_2 = a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \cdots + a_{2n} x_n + b_2 \\ \cdots \\ y_n = a_{n1} x_1 + a_{n2} x_2 + \cdots + a_{nn} x_n + b_n \end{cases}$$

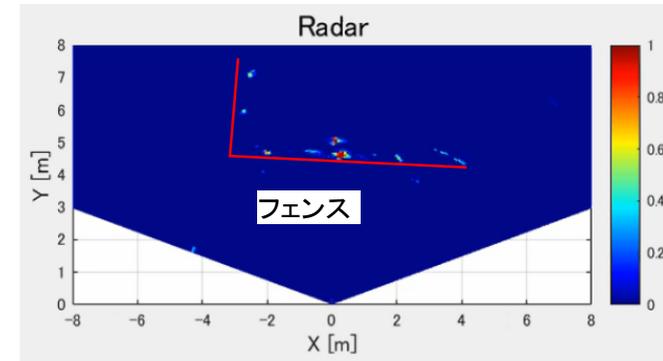
【LiDARに映らず、Radarに映る、身近な例】 ② 鉄製フェンス

動画(21秒)

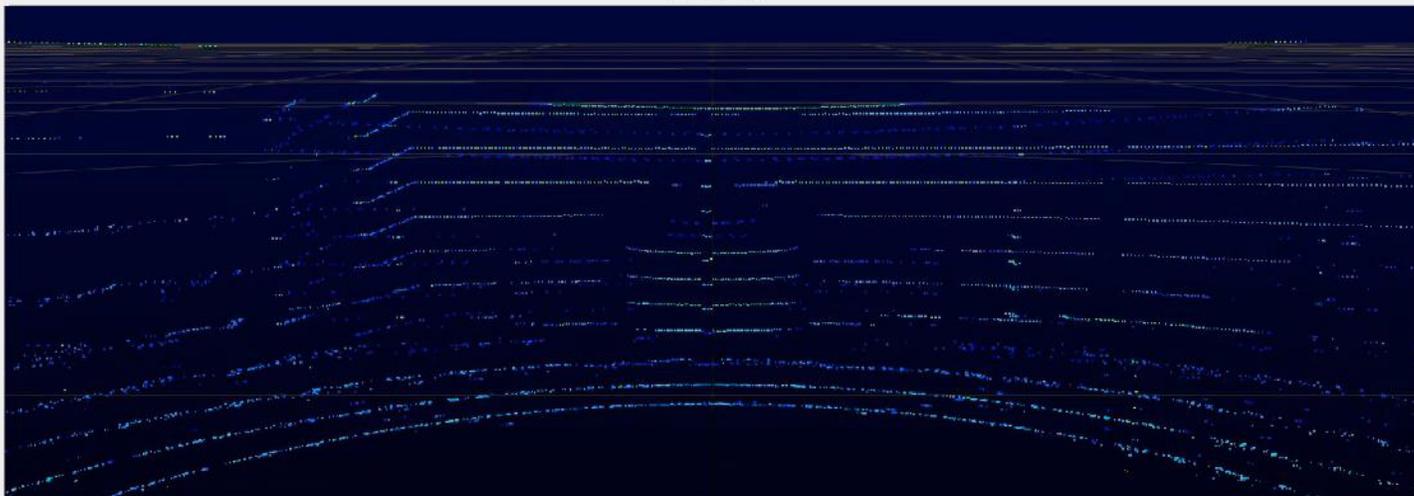


【Radar】

○ 映る。



LiDAR

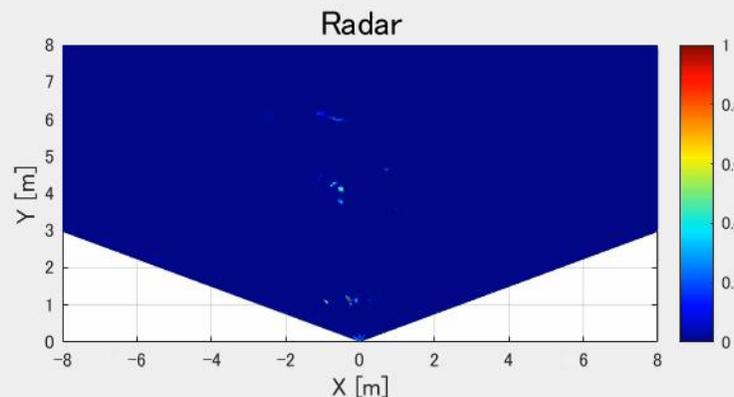


【LiDAR】

× 映らない。

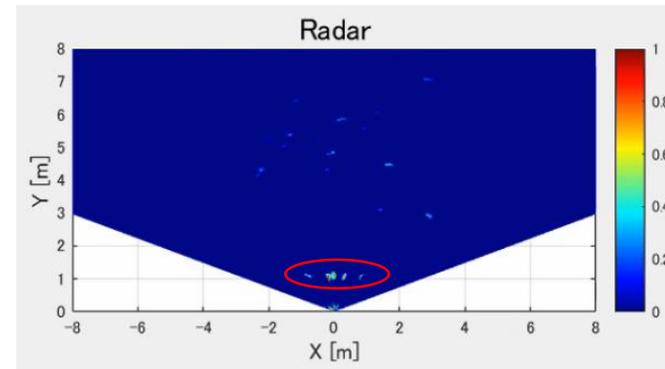
【LiDARに映らず、Radarに映る、身近な例】 ③ 細いポールやワイヤー

動画(43秒)



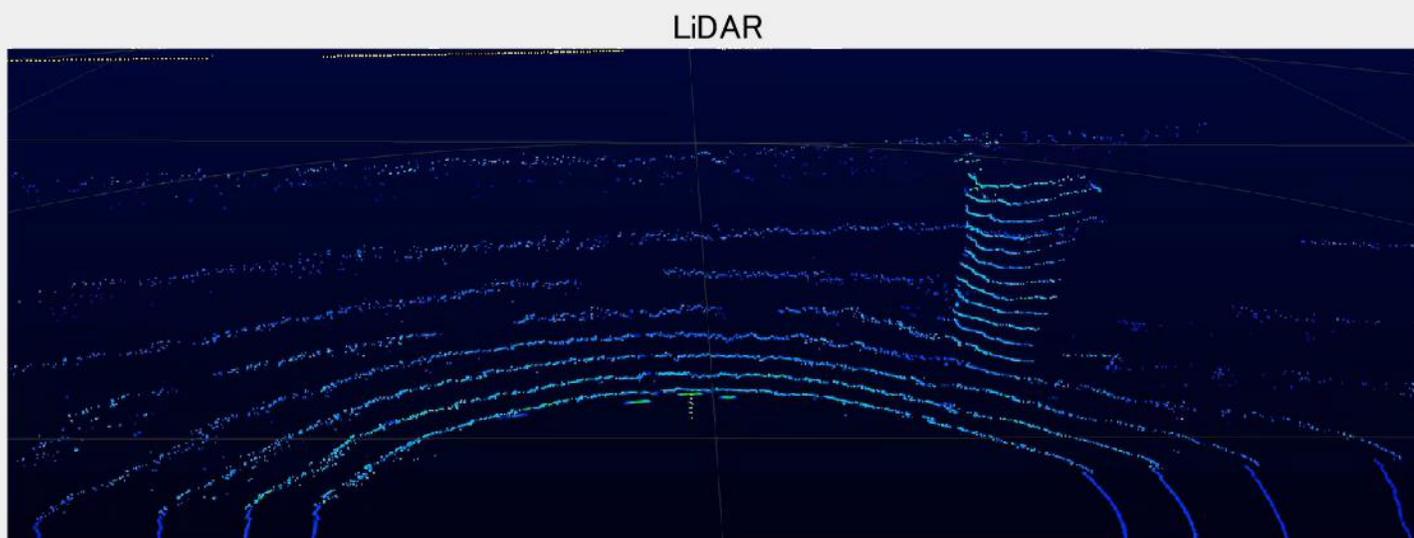
【Radar】

○ 映り易い。



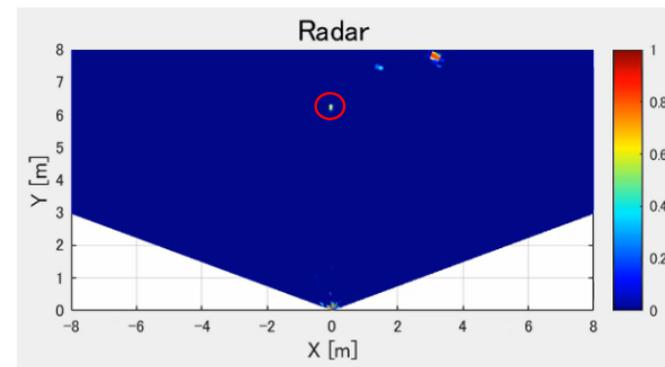
近い場合

ポール(鉄)もワイヤー(繊維)も映る。



【LiDAR】

× 映り難い。



遠い場合

ポール(鉄)だけが映る。

Agenda

1	1次元 Radarの原理（距離方向）
2	2次元 Radarの原理（方位方向）
3	Radarの特徴、特にLiDARとの比較
4	Radarの電波法
5	まとめ

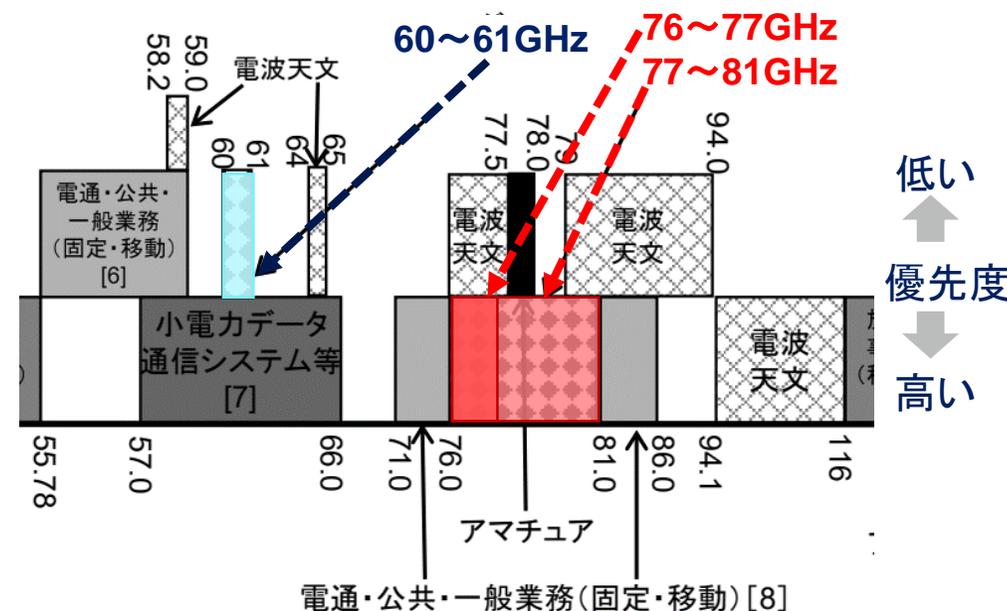
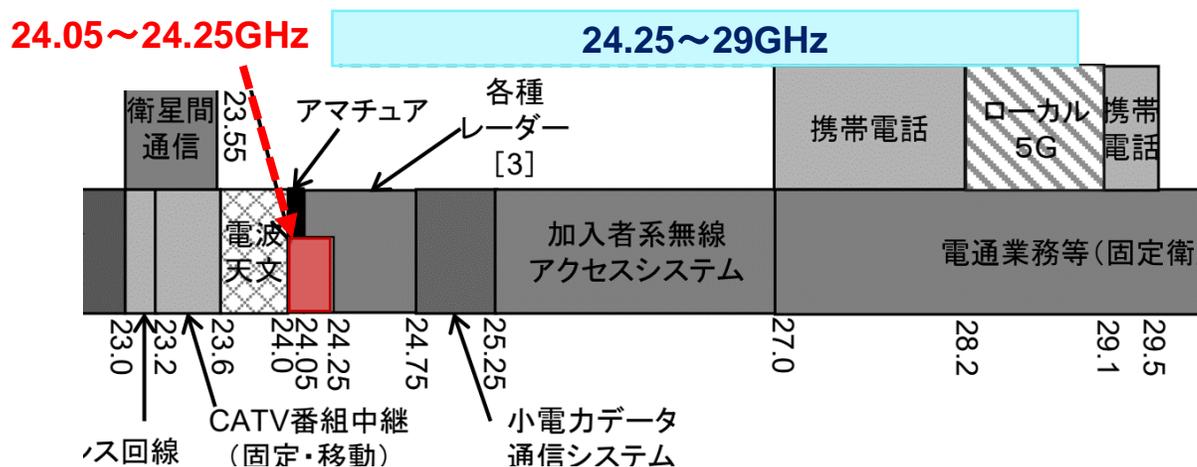
電波法：自動車レーダに関する周波数の割り当て

名称	周波数	帯域幅	特徴	ARIB規格
24GHz ISM	24.05~24.25GHz	0.2GHz	世界共通の産業科学医療用の周波数帯(車以外も利用)	STD-T73
24GHz UWB	24.25~29GHz	5.75GHz	低い出力(-41.3dBm/MHz)のため近距離用途	STD-T91
60GHz帯	60~61GHz	1GHz	車室内乗員検知向けの利用が進んでいる	STD-T48
77GHz帯	76~77GHz	1GHz	自動車レーダー 遠距離向け '96策定(0.5GHz幅)、'15改定 1GHz幅	STD-T48
79GHz帯	77~81GHz	4GHz	自動車レーダー 高分解能向け '12策定(3GHz幅)、'17改定 4GHz幅	STD-T111

ISM: Industrial Scientific and Medical Band

周波数の割り当て

用途を決めて周波数を共有し利用している

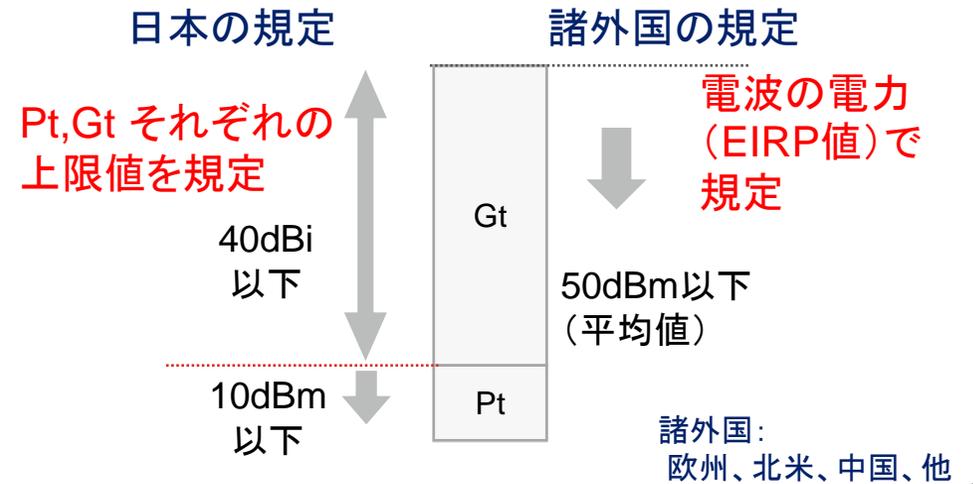
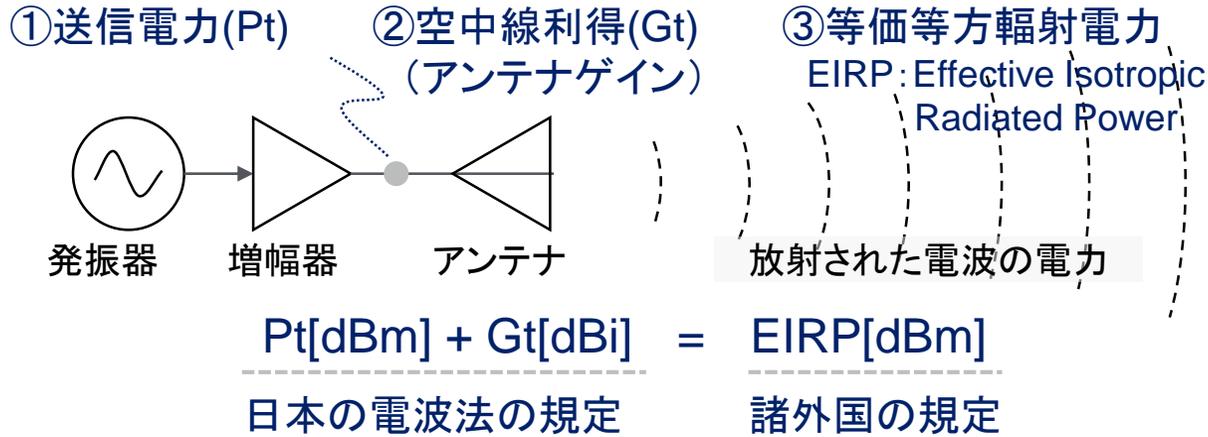


低い
↑
優先度
↓
高い

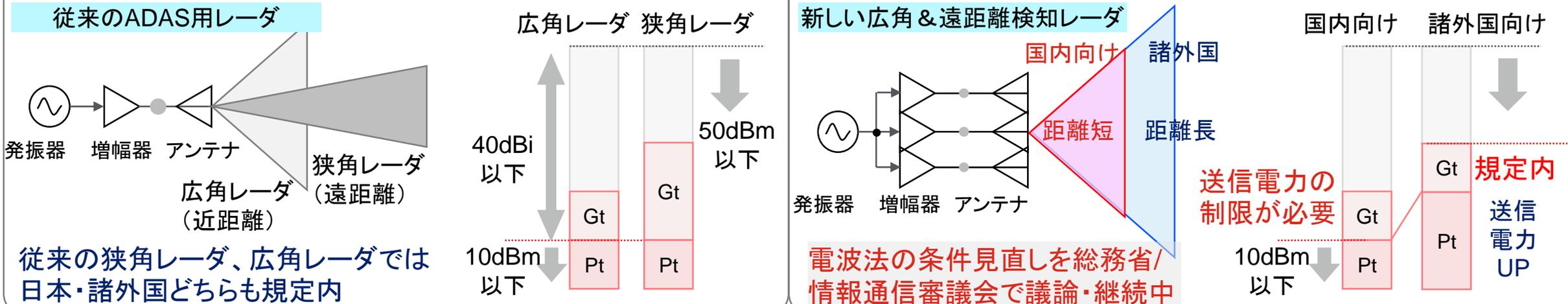
総務省 電波利用ホームページ | 周波数割当て | 使用状況の詳細(令和6年3月1日現在) (soumu.go.jp)

電波法：電波の強さの規定

国内と諸外国で、ミリ波レーダが放射する電波の強さの定義方法が異なる



定義方法の違いで、国内では送信電力を制限⇒検知距離が短くなる



Agenda

1	1次元 Radarの原理（距離方向）
2	2次元 Radarの原理（方位方向）
3	Radarの特徴、特にLiDARとの比較
4	Radarの電波法
5	まとめ

まとめ

- ミリ波レーダの**原理**を、段階的に説明した。
 - 現在主流のFMCWレーダの本質は、伝搬距離に応じた**位相回転の測定器**に過ぎない。
 - 1次元レーダは、変調波によって**距離**を検出。
 - 2次元レーダは、複数のアンテナによって**方位**を検出。
- ミリ波レーダの波長は、LiDARの波長よりも4000倍も大きいいため、下記**特徴**がある。
 - 空中でミ－散乱が起きにくいいため、**悪天候に強い**。
 - LiDARで映りにくい物体が、ミリ波レーダで映り易い場合がある。
- 電波法について
 - 日本と諸外国で電波法の規定が異なり、**国内向けは送信電力を下げる必要**あり。
 - 電波法の見直しを情報通信審議会で議論中ですので注視願います。



Thank you for your kind attention!

Tokyo Odaiba → Virtual Community Ground

END

