

木寺研究室の紹介

研究室HP

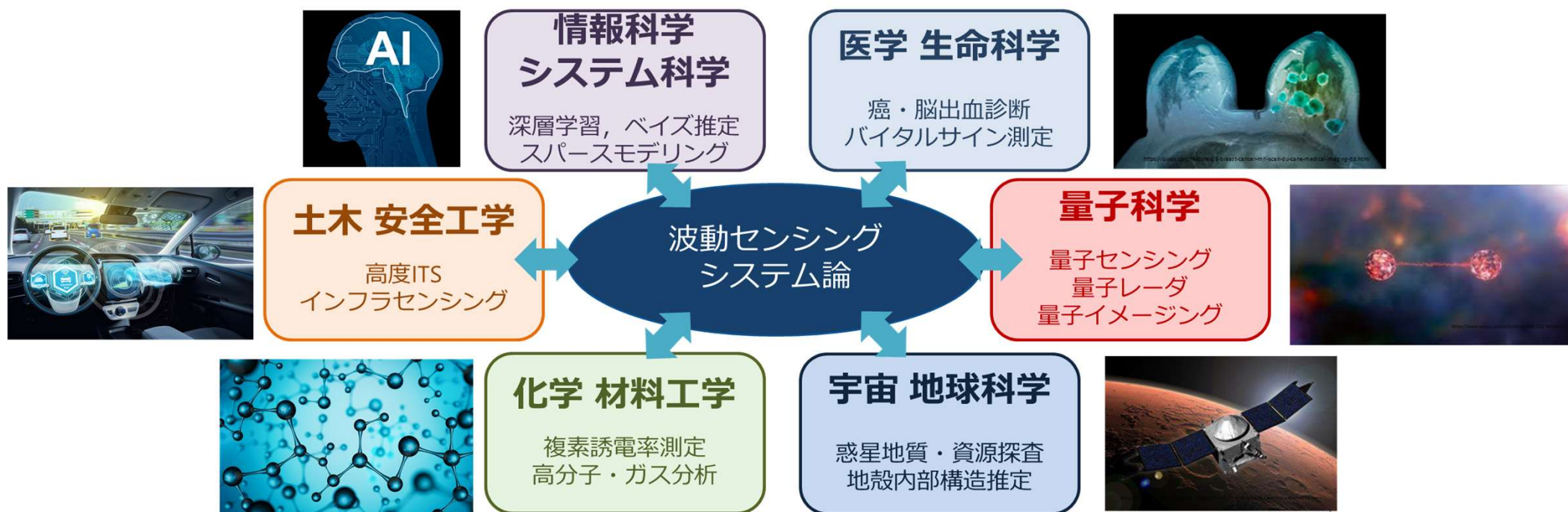


キーワード：

マイクロ波・ミリ波・テラヘルツ波 センシング，
癌細胞検知・治療，非破壊計測，人体識別
レーダ，トモグラフィ，画像解析，信号処理
深層学習，逆問題解析，統計処理

木寺研究室の紹介

目標：マイクロ波・ミリ波・テラヘルツ波等の波動センシングにおいて
革新的研究基盤の構築と**多様な応用展開**を通じて
学術的・社会的に重要な課題の解決に貢献



マイクロ波・ミリ波帯 電磁波センシング

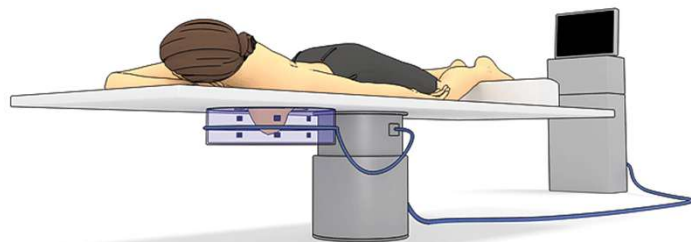
マイクロ波帯：0.1 GHz-10GHz（波長：数m-数cm）

- ・ 損失性誘電体の**到達深度が深い**
（コンクリート，木材，土壌：50cm-1m）
（生体，人体組織：5-10cm（脂肪組織））
⇒各種の非破壊検査，医療診断等に有望

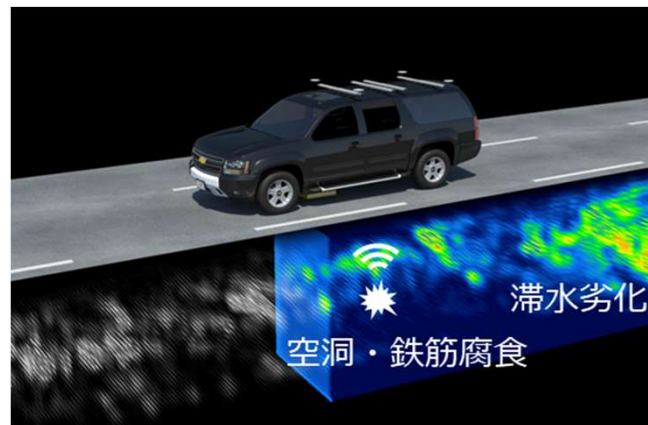
ミリ波帯：10GHz-100GHz（波長：数cm-数mm）

- ・ 水蒸気・粉塵等の微粒子を透過，**回折・多重散乱**効果
⇒自動運転等で必須の全天候型周囲センサ，
影領域の人体検出・識別等に有用

マイクロ波乳癌診断



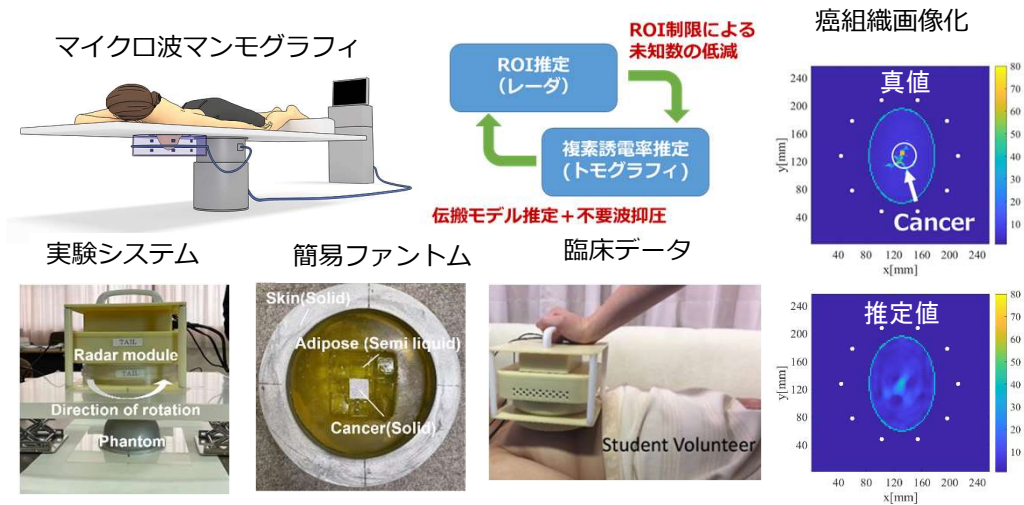
マイクロ波非破壊道路検査



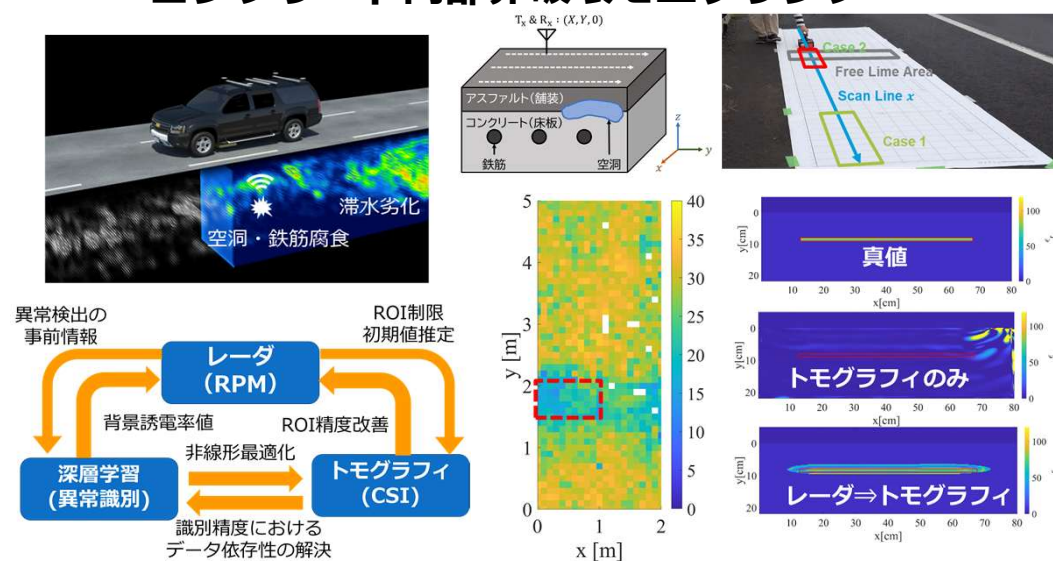
ミリ波車載センサ



マイクロ波マンモグラフィ + 癌治療

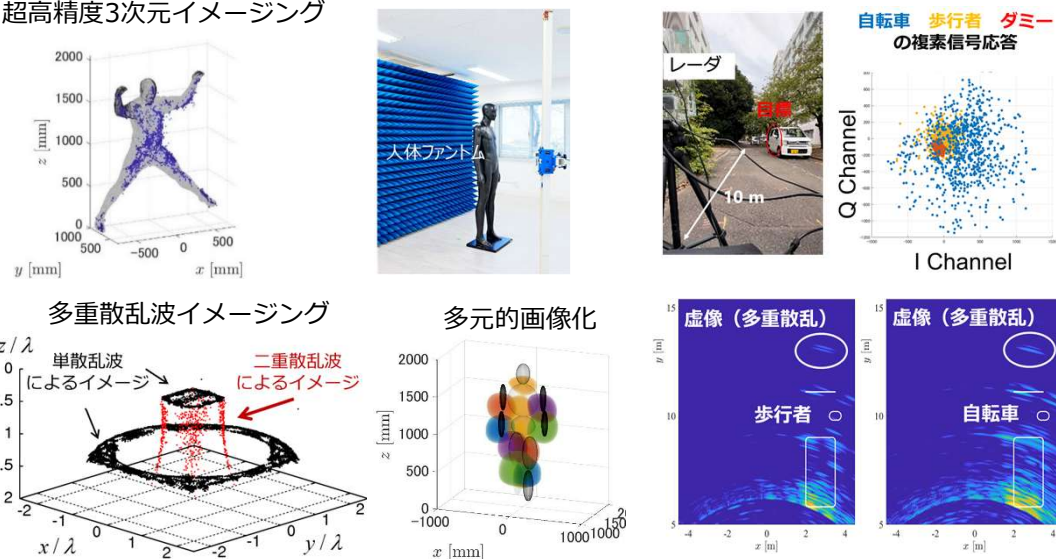


コンクリート内部非破壊モニタリング

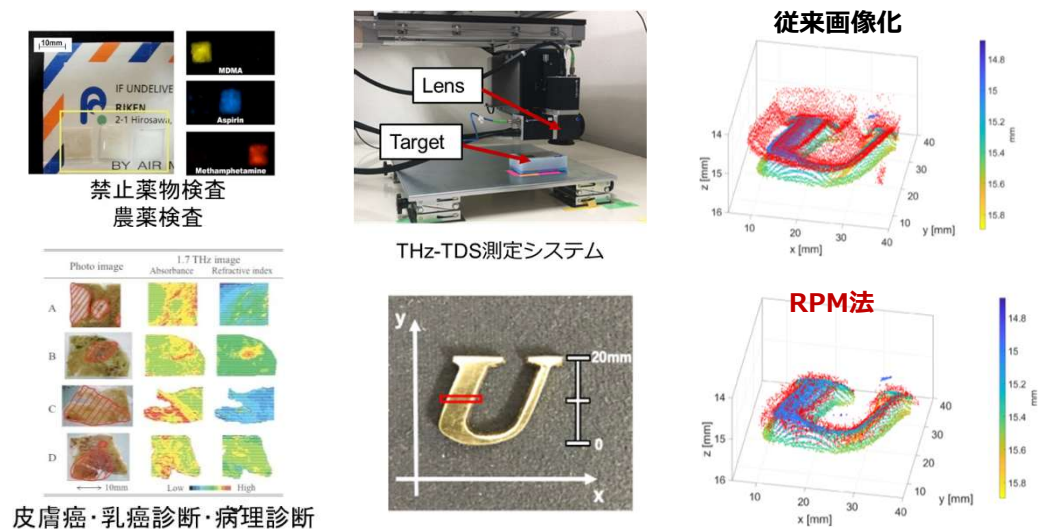


自動運転等での周囲センシング

超高精度3次元イメージング



テラヘルツ波帯での3次元イメージング



マイクロ波による医療診断 及び治療

マイクロ波による乳がん診断の特徴

乳癌：

- ・ 癌の罹患率トップ（国内外）

既存診断技術：X線マンモグラフィ

- ・ 放射線による被曝、圧迫
- ・ 高濃度ブレストでの識別が困難

⇒受診率：30%程度

X線マンモグラフィ診断例



マイクロ波マンモグラフィ

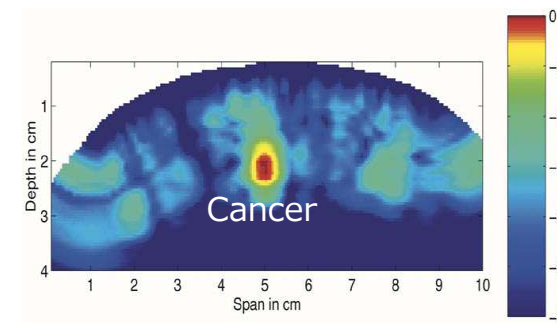
簡易スクリーニング検査として有望視されている

癌細胞の電気的特性を利用：正常細胞と癌細胞に有意な差

利点：低コスト・非接触・安全・簡便 → 受診率の向上が期待される



<https://www.chalmers.se/en/Projects/Pages/Microwave-tomography-for-breast-cancer.aspx>



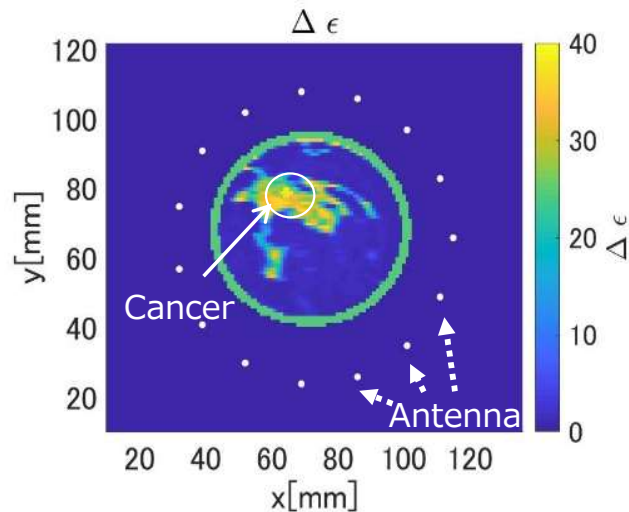
正常細胞と癌細胞の電気的特性

〈表1〉 脂肪組織の電磁気学的パラメータ

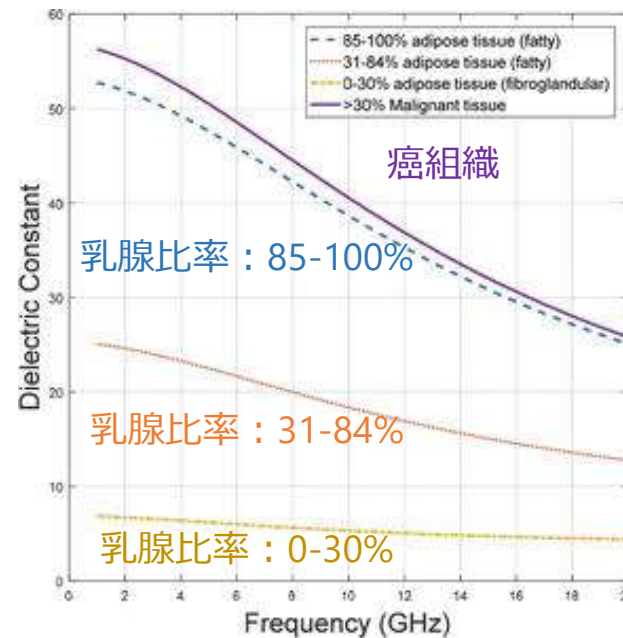
項目	比誘電率 ϵ_s	比誘電率 ϵ_{∞}	導電率 σ_s [S/m]	伝搬遅延時間 τ [ps]
脂肪層	6.9	3.58	0.053	15.2
乳腺組織	49	21	0.72	17
癌	56	23	0.8	17
皮膚	37	4	1.1	7.23
筋肉	58	4	0.7	7

<http://www.rf-world.jp/bn/RFW25/samples/p042-043.pdf>

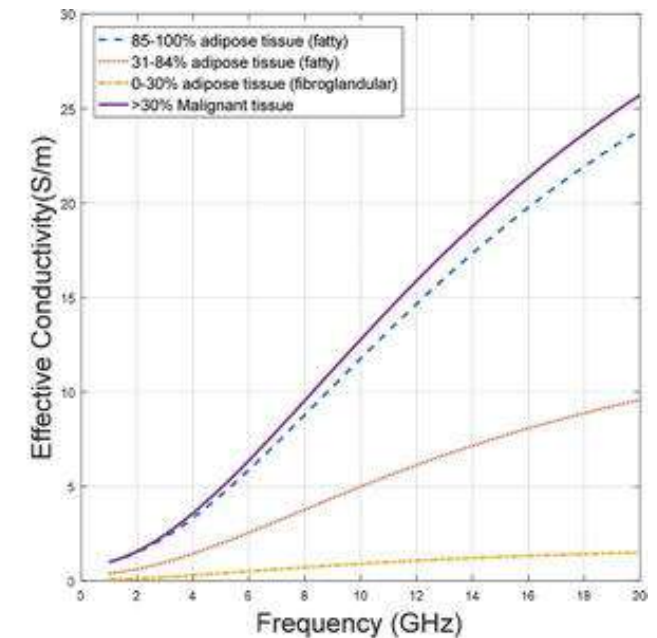
乳癌組織の誘電率分布



比誘電率



導電率



マイクロ波イメージング：レーダ方式

手法：ビームフォーミング法^[3], Synthetic aperture radar (SAR)^[4]

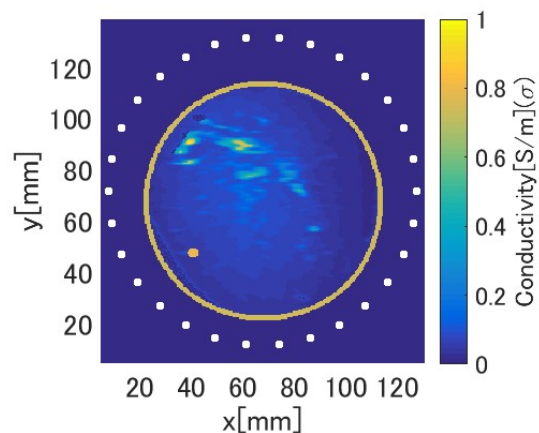
長所：

- 再帰的处理が不要であり，計算コストが低い

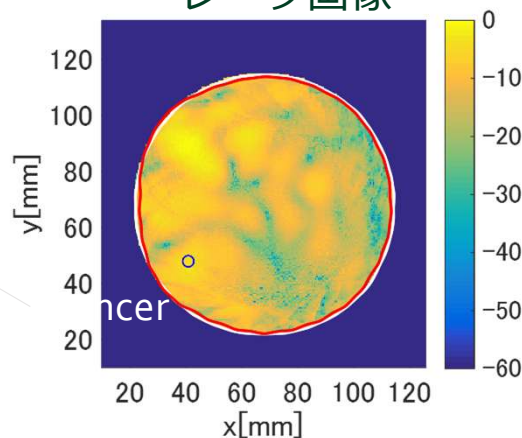
短所：

- 複素誘電率の定量的な評価が困難
- 低コントラスト(癌/乳腺=1.2程度)の場合，識別が困難
- 不均質な媒質では単純な伝搬モデルで対応できない

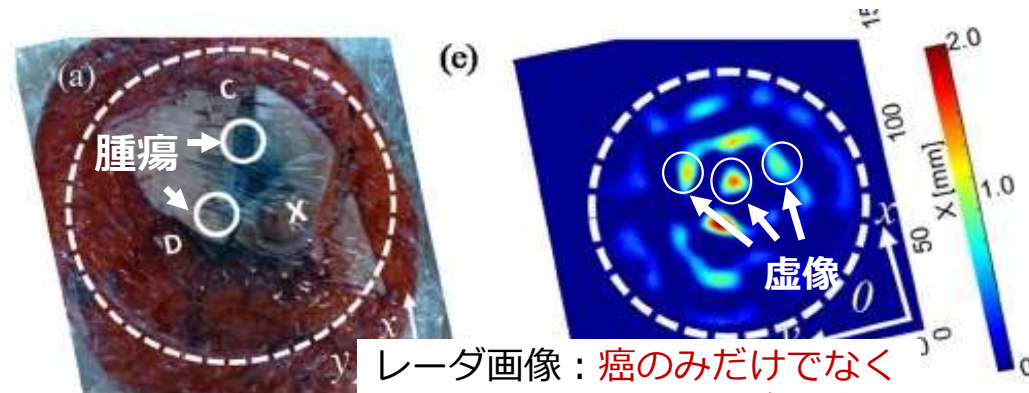
乳房モデルの導電率分布



レーダ画像



乳癌組織に対するレーダ画像

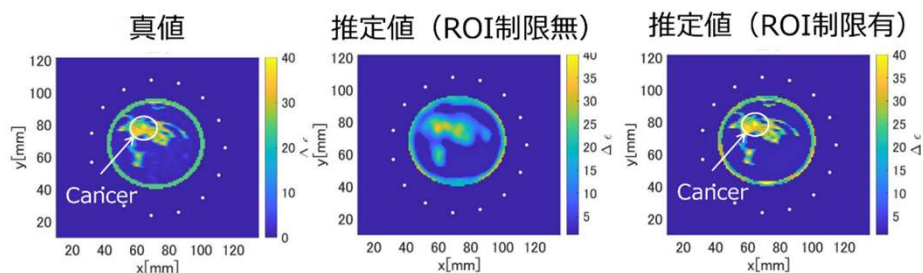


レーダ画像：癌のみだけでなく
乳腺からも強い応答

H. Song, "Detectability of Breast Tumors in Breast Tissues of Total Mastectomy by IR-UWB-Radar-Based Breast Cancer Detector", IEEE Trans. EMB, Aug., 2019.

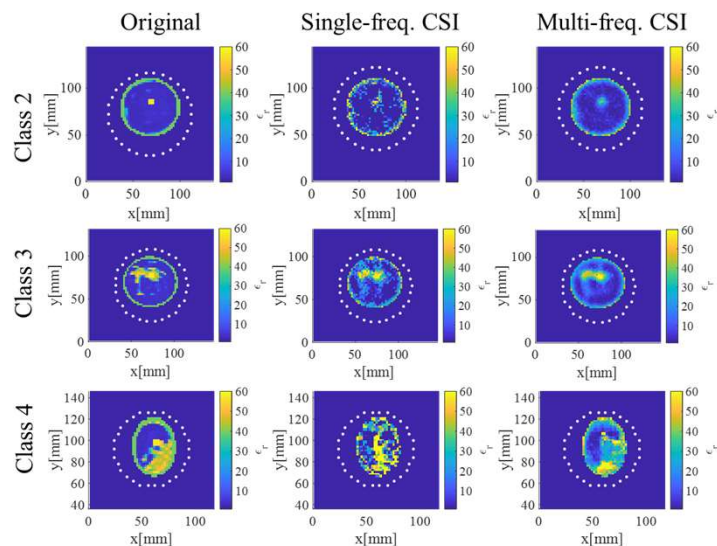
トモグラフィ方式の導入と改良法の検討

ROI制約による高精度化



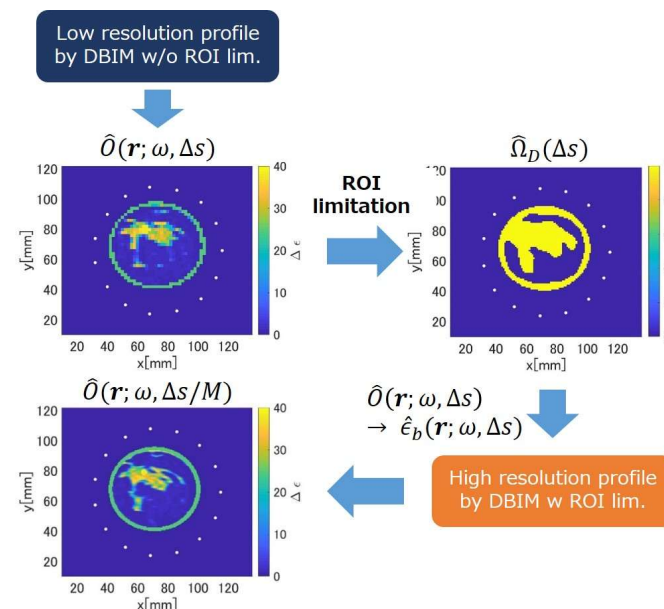
H. Sato and S. Kidera, *IEEE AWPL*, Dec. 2020.

複数周波数データによる高精度化



H. Sato and S. Kidera, *IEEE JERM*, June, 2021.

ROI制約 低解像度⇒高解像度画像化への変換



Y. Suzuki and S. Kidera, *IEEE JERM*, Apr., 2021.

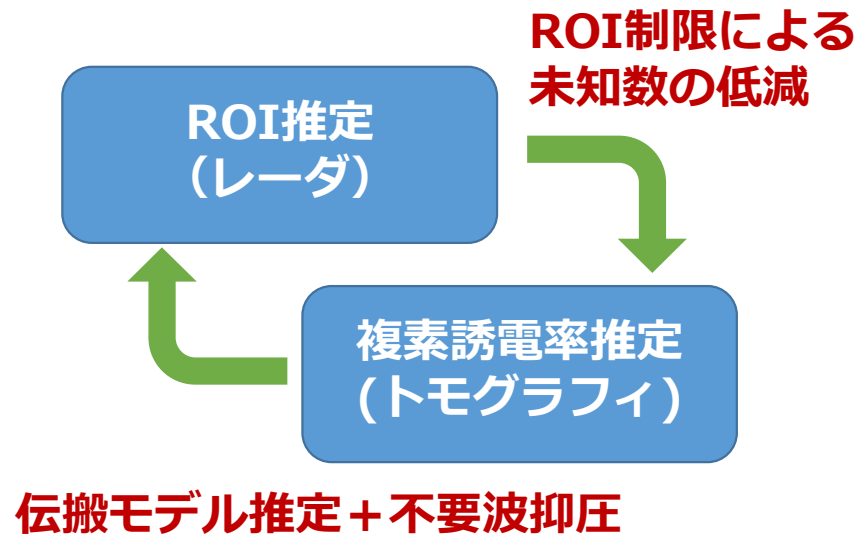
トモグラフィの問題点

- ・ 不良設定性, 初期値依存性

⇒ レーダ方式との双方向融合

ROI (関心領域) 制限, 初期値依存性を解消

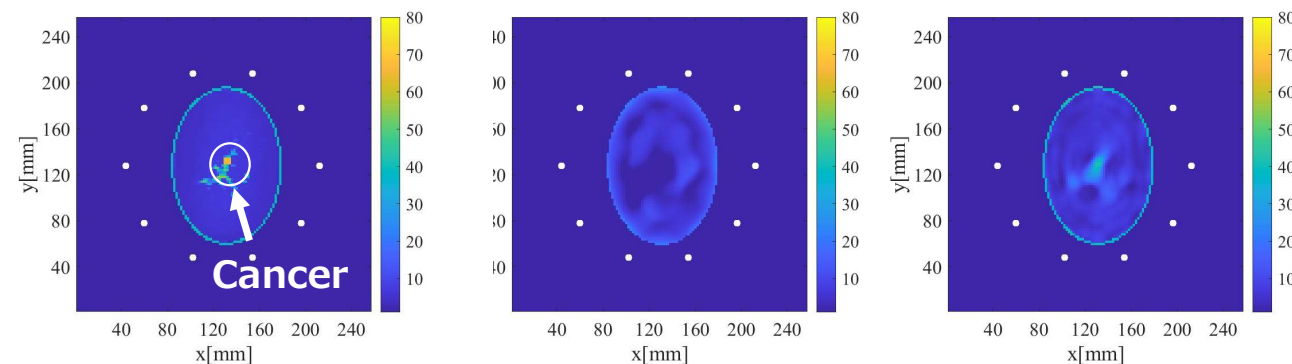
レーダ ⇔ トモグラフィ 双方向処理 の導入



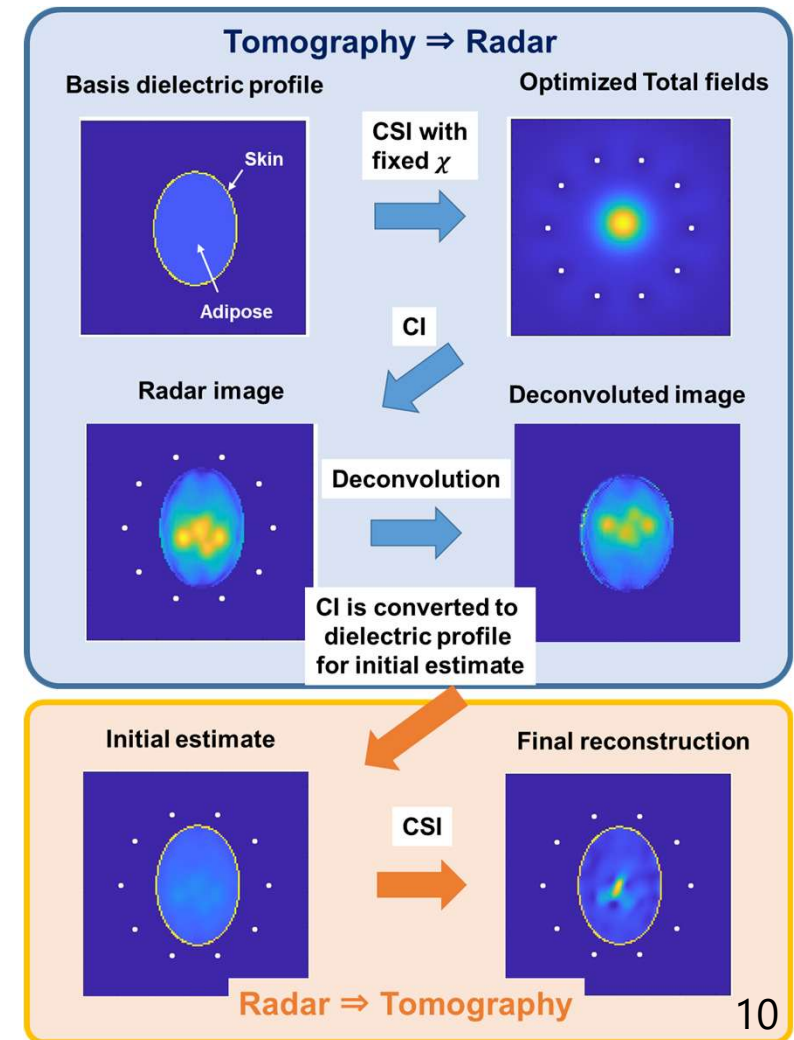
真値

トモグラフィのみ

レーダ ⇔
トモグラフィ



レーダとトモグラフィの双方向融合



提案手法：背景更新型トモグラフィ法

背景更新型CSI (BU-CSI*)の原理

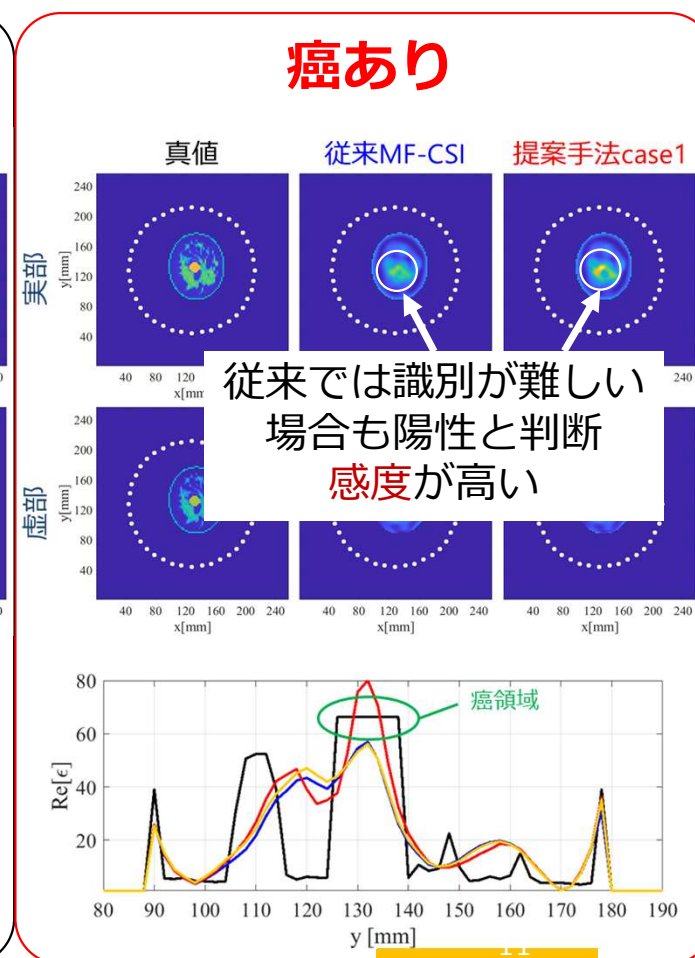
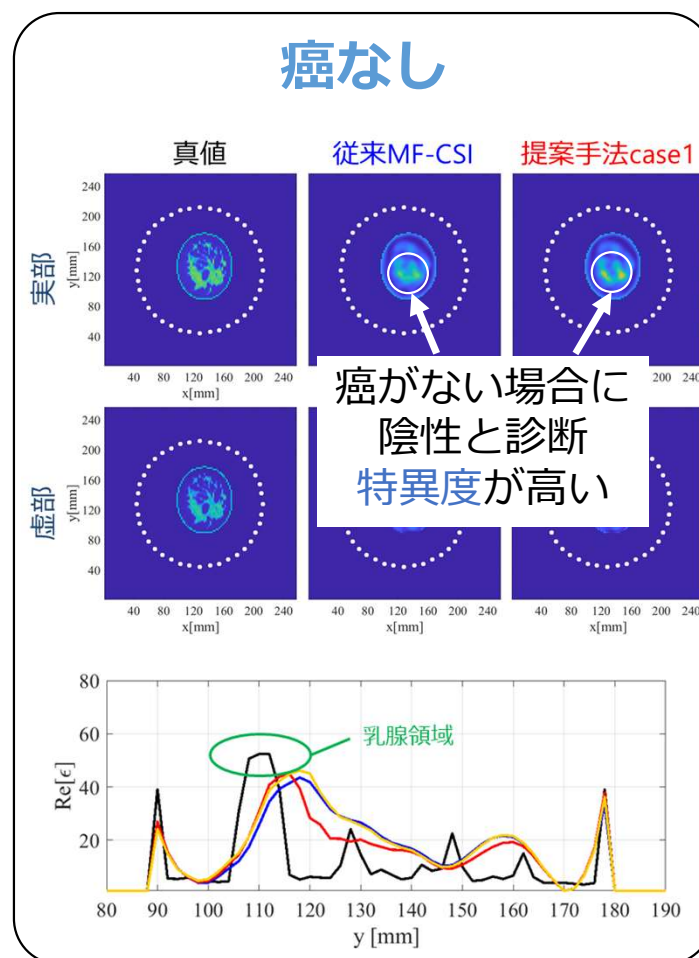
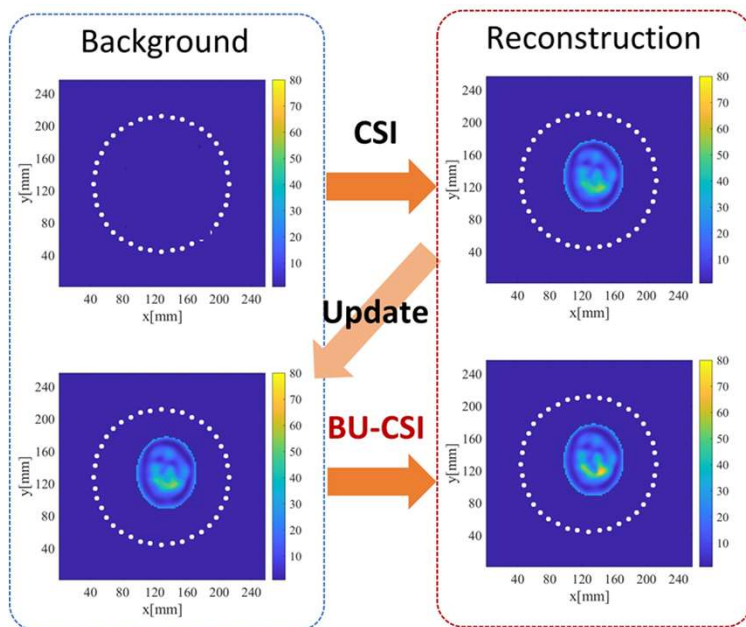
目的：背景媒質を逐次更新することで非線形性に起因する精度劣化を解消

癌診断：

感度（癌有を陽性と診断）

特異度（癌無を陰性と診断）

の両方が重要



臨床試験：広島大学病院との協働

文科省 生体医歯工学共同研究拠点：

- ・広島大学 ナノデバイス・バイオ融合科学研究所
吉川 公麿 特任教授
- ・同大学医学研究科 岡田教授，笹田講師

マイクロ波UWB装置（右図）

⇒ **臨床試験データ**を取得済(2019年度)

- ・症例数（癌あり：107例，癌なし：147例）

MRI画像を同時に撮像

⇒ リファレンスとして使用可能

進行中のプロジェクト：

共同研究 広島大学生体医歯工学共同研究拠点
島津製作所



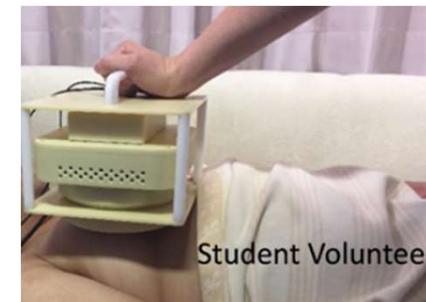
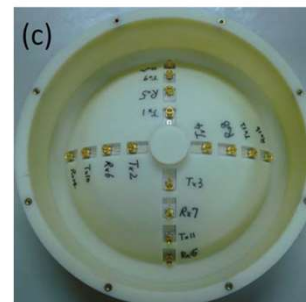
広島大学病院



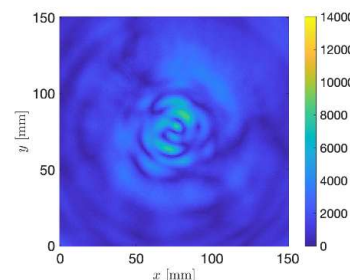
SHIMADZU

UWBレーダモジュール

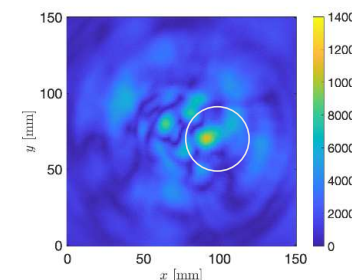
計測風景



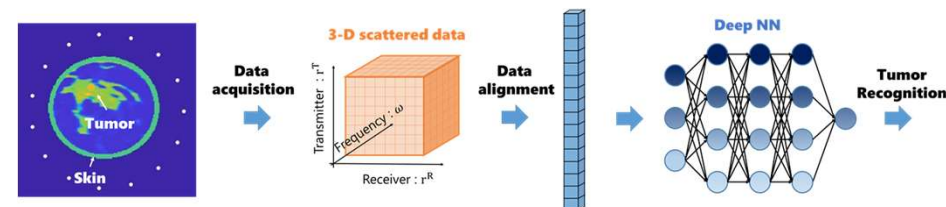
正常



悪性腫瘍あり

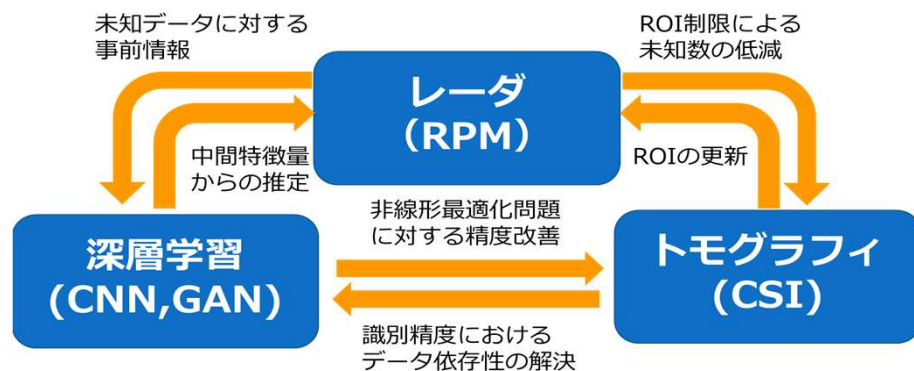


深層学習による識別モデル

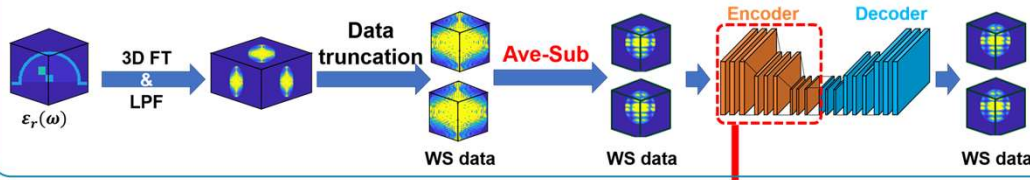


[7] Song, H., Sasada, S., Kadoya, T. et al. Detectability of Breast Tumor by a Hand-held Impulse-Radar Detector: Performance Evaluation and Pilot Clinical Study. *Sci Rep* **7**, 16353 (2017).

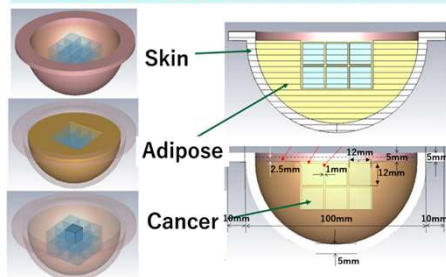
深層学習を用いた3次元誘電率分布画像化



Step 1: Compression of input dimension by LPF (Low-pass filter) in wavenumber space domain
 Step 2: Average subtraction process (Ave-Sub) is applied to **remove common components such as skin**.
 Compressed WS data is further compressed by 3D-CAE



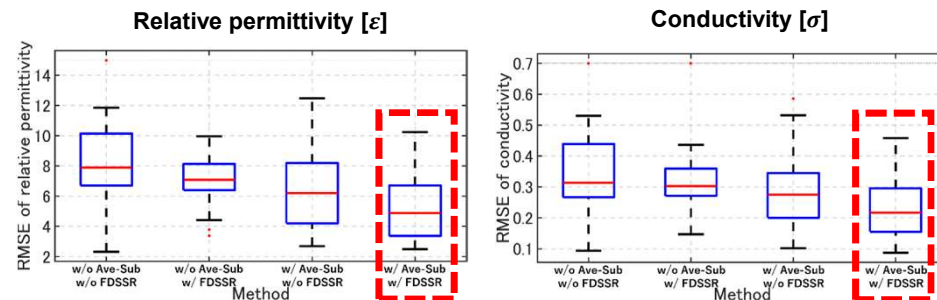
- 18 cubes (12mm) are set in center of phantom.
- Number of cube types: 5 summarized in Table
- **66 combination** patterns are generated.



Type	Permittivity	Conductivity [S/m]
Adipose (semi solid)	3.60	0.09
Fibro-glandular	22.84	0.97
Cancer (low)	27.51	1.07
Cancer (middle)	32.05	1.56
Cancer (high)	46.63	2.04
Skin	22.84	0.97

5 types of cubes

3次元複素誘電率イメージング例



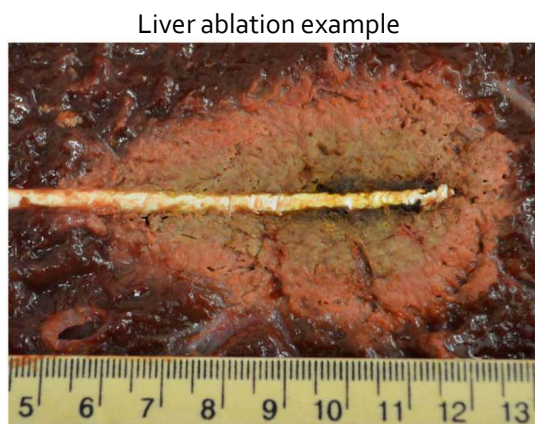
マイクロ波による癌治療(マイクロ波焼灼)

マイクロ波アブレーション Microwave ablation (MWA) :

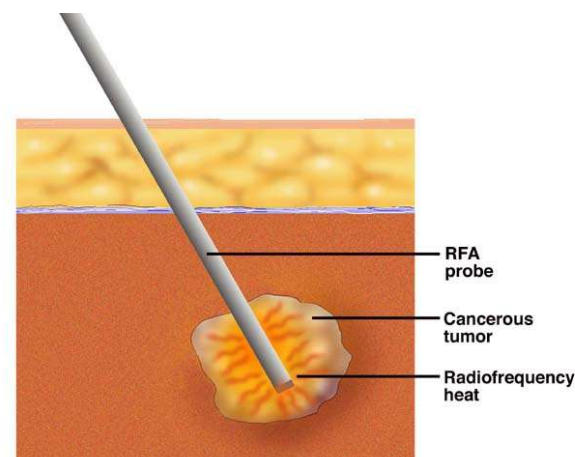
- ・ 乳がん治療において最も侵襲の少ない治療法
(マイクロ波プローブを癌細胞付近に挿入し,
その周囲を高周波電磁波で焼灼)
→ 肝臓がん, 腎臓がん, 肺がん治療で利用されている

MWA治療でのポイント :

- ・ 焼灼領域をリアルタイムでモニタリングする必要がある
→ マイクロ波を利用したモニタリング (イメージング)



H. Luyen, S. C. Hagness, and N. Behdad., "A Balun-Free Helical Antenna for Minimally Invasive Microwave Ablation" IEEE TRANS. ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 63, NO. 3, MARCH 2015



© Society of Interventional Radiology, www.SIRweb.org

<http://www.drcradiology.com/imaging/images/rfa2.jpg>

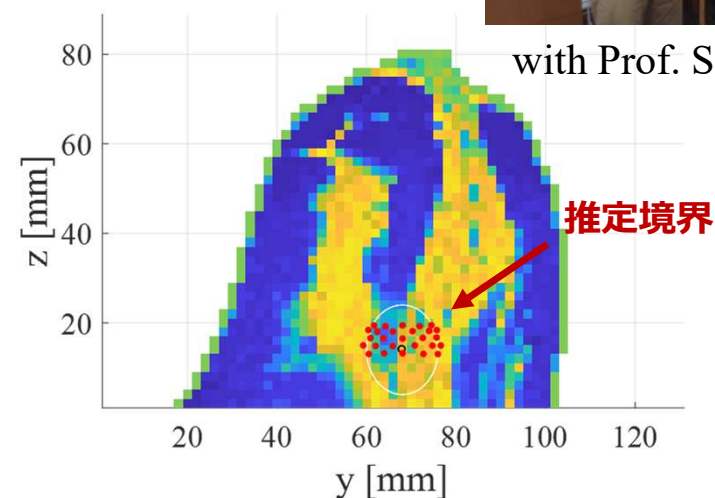
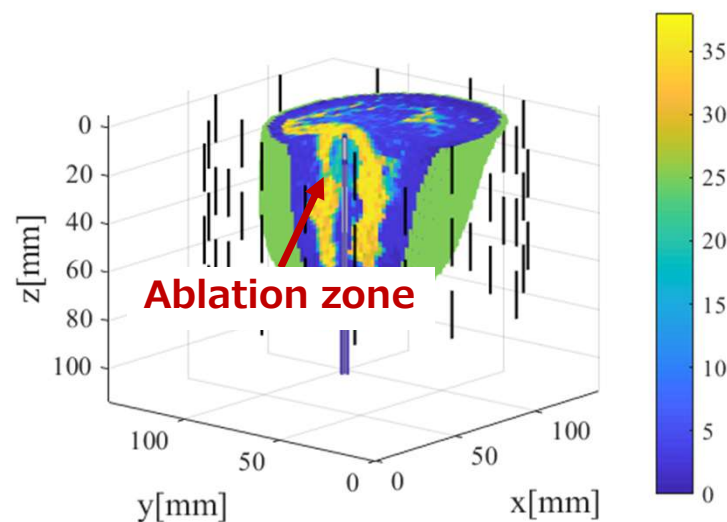
リアルタイムMWAモニタリング

提案技術：

アブレーション前後の受信信号の相関関係から境界を高速に推定



with Prof. S. Hagness (2016)



計算時間: **within 0.1 sec**(Intel Core i5 CPU 3.3 GHz)
リアルタイム性・高精度・ノイズロバスト性を同時に実現！

S. Kidera, L. M. Neira, B. D. Van Veen and S. C. Hagness, "TDOA-Based Microwave Imaging Algorithm for Real-Time Microwave Ablation Monitoring ", International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2018.

マイクロ波によるコンクリート非破壊検査

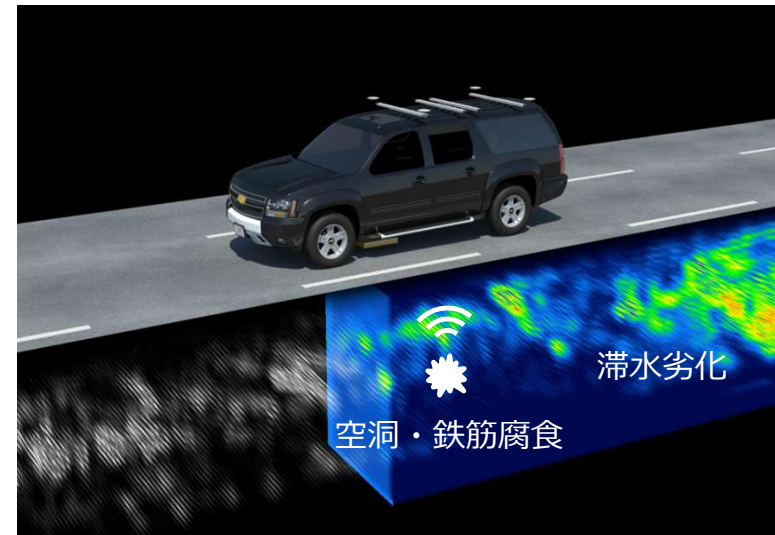
マイクロ波による非破壊道路モニタリング

従来の非破壊検査

- ・超音波探傷試験
- ・打音検査
- 接触計測のため大規模領域の検査は困難

マイクロ波による検査

- ・ 50cm程度の到達深度(コンクリート)
- ・ 非接触計測が可能
 - 車両搭載で高速データ取得
- ・ 広い指向性
 - 大規模領域を迅速に検査



- ・ 従来の電磁波探査技術：レーダ方式
背景媒質（コンクリート）と異なる複素誘電率を有する物体（鉄筋，空洞，水等）からの反射波による探知・位置形状同定
- ・ レーダ方式の問題点：反射強度のみを表示
物体の物性（複素誘電率）を特定することが困難
（土木研究所 CAESAR* 及び各種メーカーでのヒアリングに基づく）

* CAESAR: 土木研構造物メンテナンス研究センター

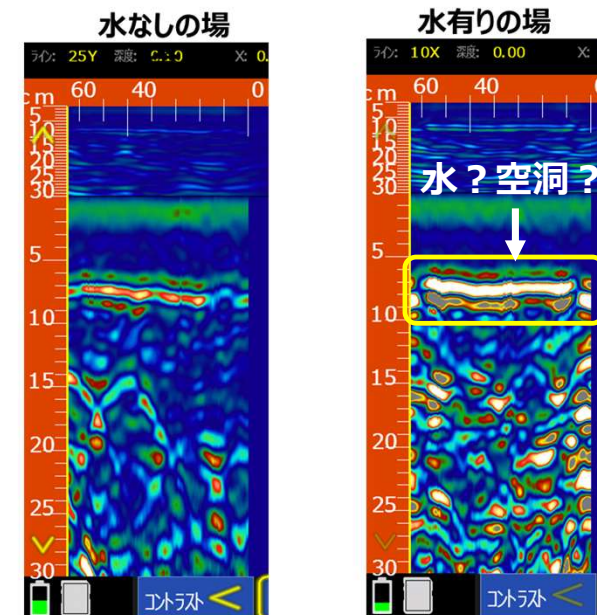
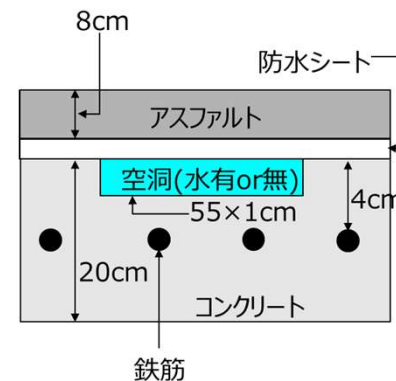
従来のマイクロ波探査技術の課題

- 従来の電磁波探査技術：**レーダ方式**
物体（鉄筋，空洞，水等）による反射波による
探知・位置形状同定
- レーダ方式の問題点：**反射強度のみ**を表示
物体の物性（複素誘電率）を特定することが困難

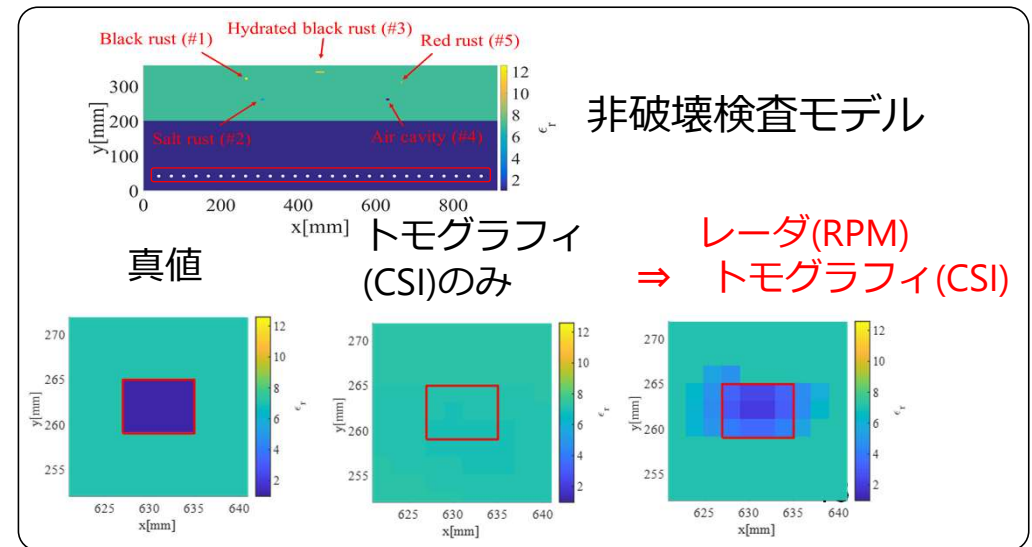
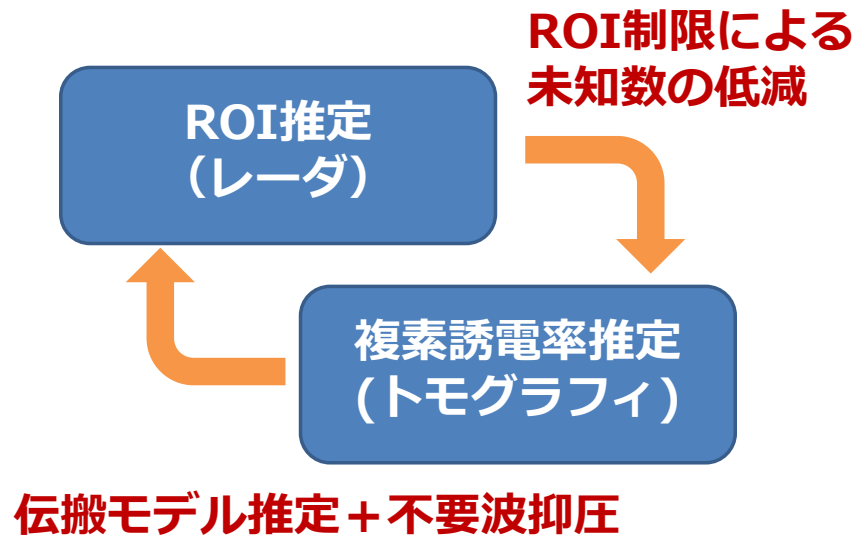
複素誘電率比較

$f = 10\text{GHz}$	$\text{Re}[\epsilon_r]$	$\text{Im}[\epsilon_r]$
空洞	1	0
コンクリート	7-8	0.01
塩錆 ^[1]	5-6	0.5
赤錆 ^[1]	8-10	1.0
黒錆 ^[1]	12-13	2-2.5

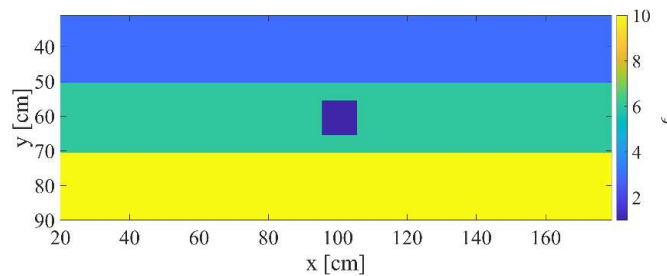
レーダ画像による水の識別



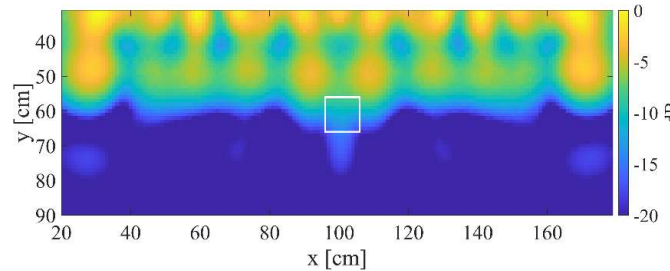
レーダとトモグラフィの双方向イメージング



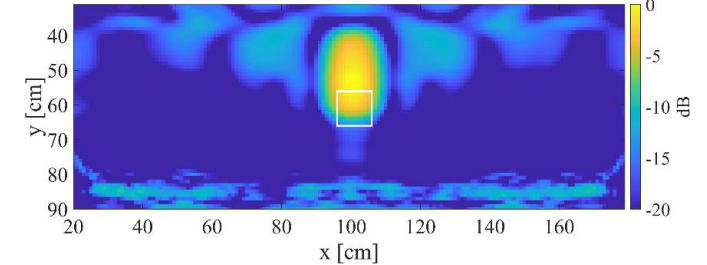
真の誘電率分布



レーダのみ



トモグラフィ⇒ レーダ



実道路試供体における複素誘電率画像化例

2.0 GHz帯 UWBレーダを用いた試供体（土木研 CAESAR提供）による

レーダとトモグラフィの融合法の実証実験

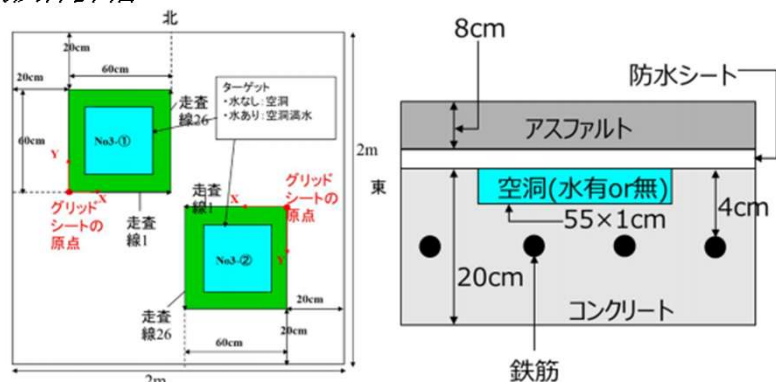
⇒ RPM法による空洞検出：高精度な位置・形状推定を実現

⇒ CSI法によるROI制約複素誘電率推定：誘電率推定において20 %程度の相対誤差

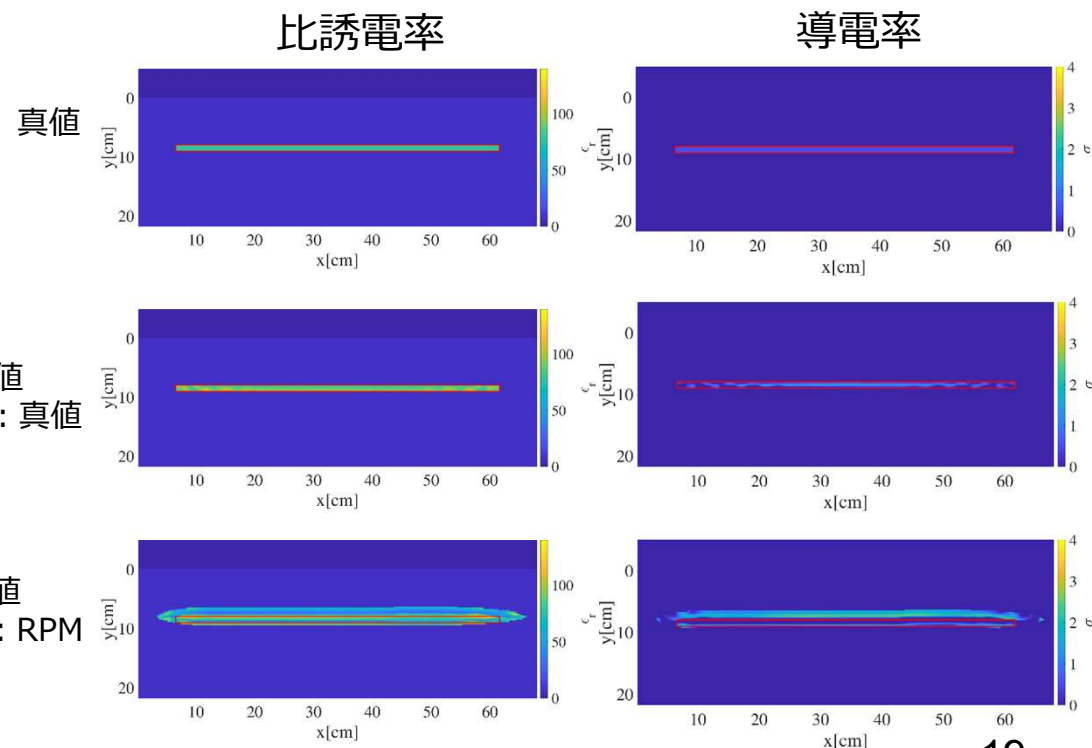
レーダ装置



・試供体詳細



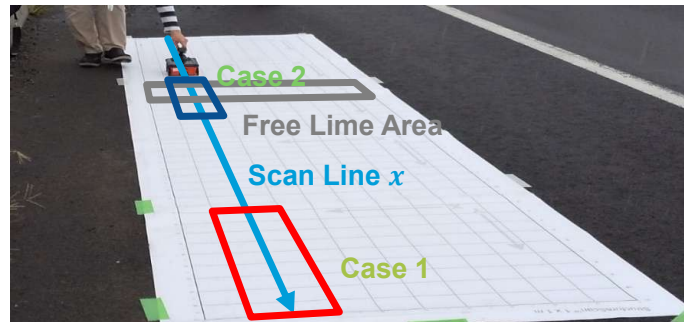
コンクリート内部の異物の複素誘電率推定を
実道路試供体で実証したのは**世界初**の報告



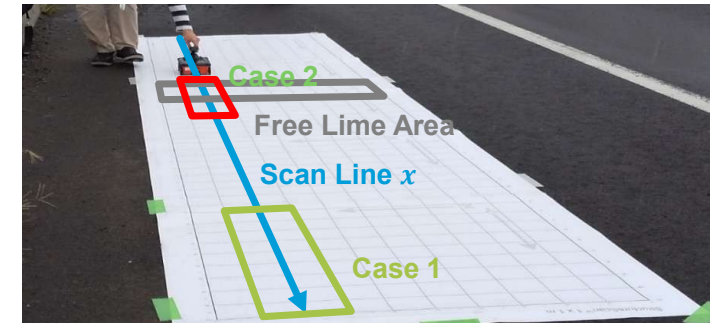
IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 投稿予定

実道路(新利根川橋)における複素誘電率イメージング結果

正常領域



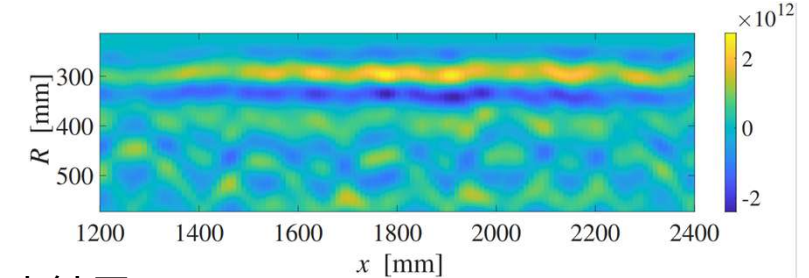
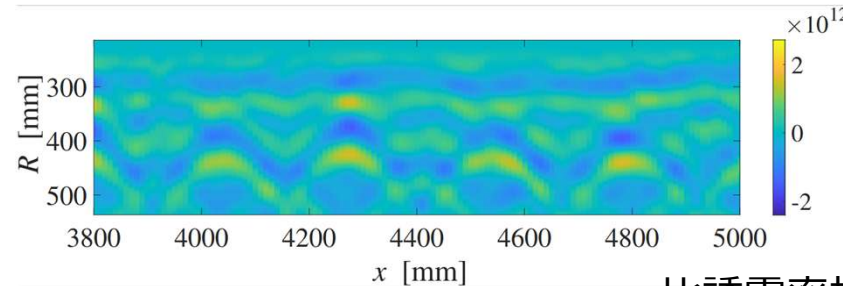
異常領域(遊離石灰)



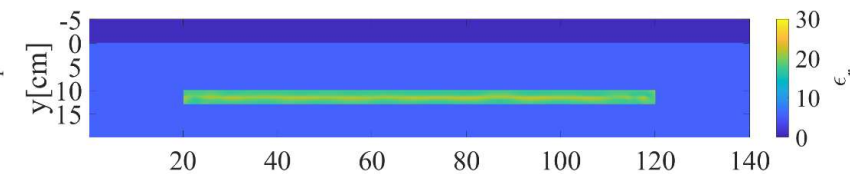
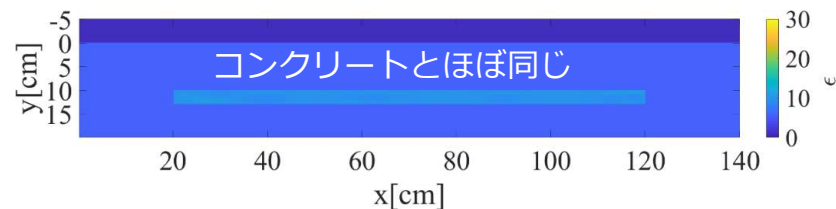
道路下面の遊離石灰箇所



レーダデータ (B-SCAN)



比誘電率推定結果



コンクリートに比べて有意に高い
⇒ 滞水状態を示唆

レーダデータの機械学習に基づく異常識別

実道路検査における課題：

数m程度の領域を迅速に検査

解決策：

異常検出による領域を絞り込み

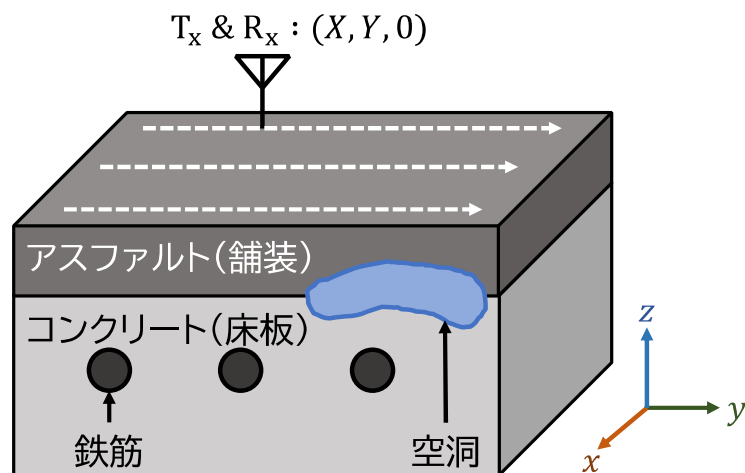
⇒ 複素誘電率画像化法を適用

教師なし学習（異常検出）：

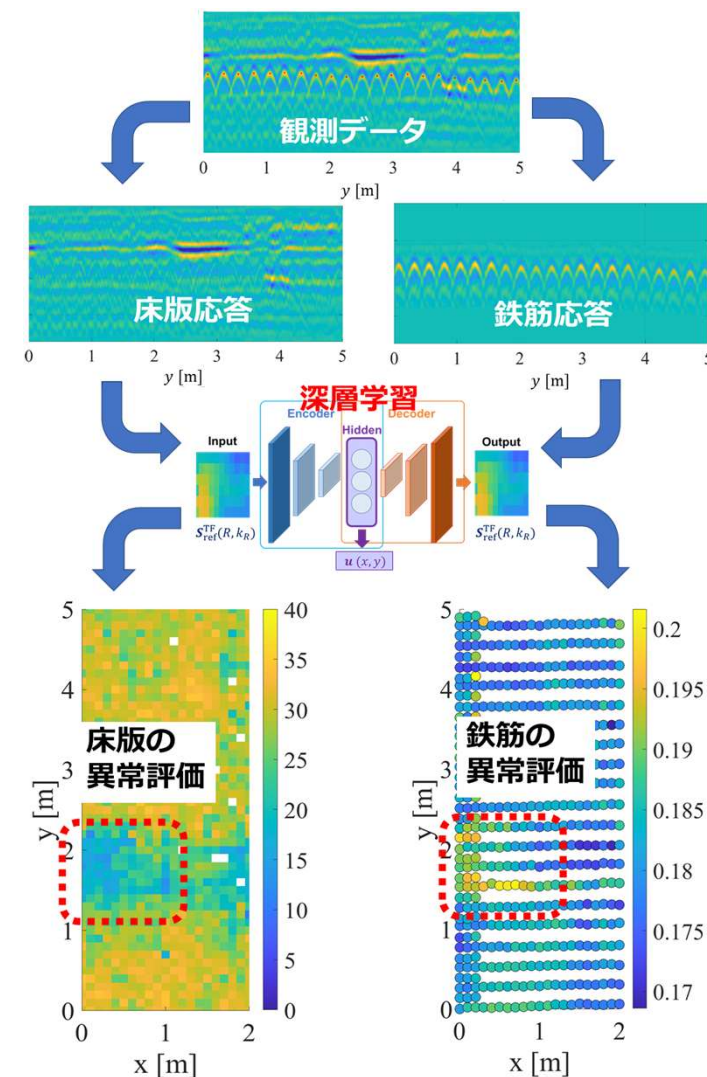
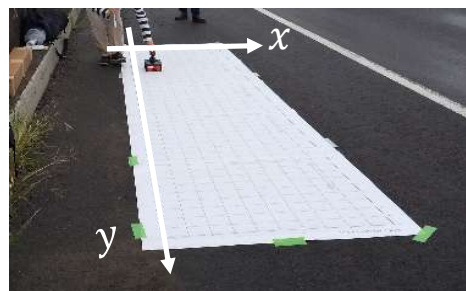
観測データの**深層学習(CAE)**及び

非線形クラスタリング(DBSCAN)

に基づく異常検出法の適用



DBSCAN (Density-based spatial clustering of applications with noise)



人物検知レーダセンサ

車載レーダの必要性

自動運転時代の到来により、
衝突回避・周囲環境モニタリングセンサの需要が高まる

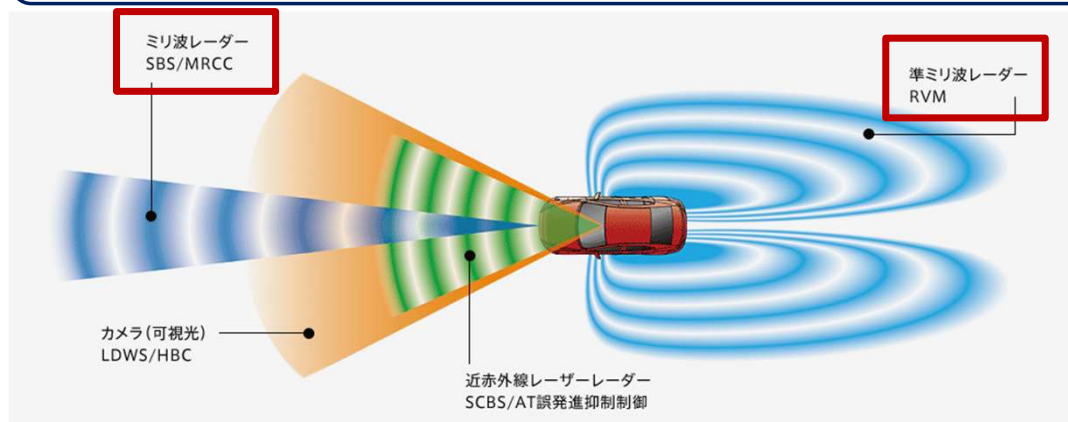
→ **昼夜全天候型**のレーダは必須

(**粉塵・濃霧・夜間・悪天候**でも計測可能)

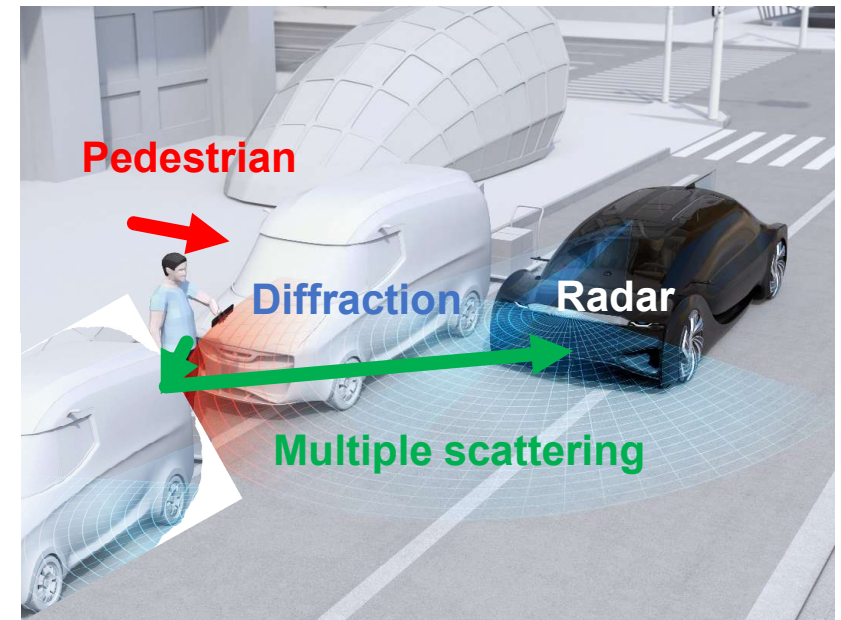
→ **回折波** 及び **多重散乱波**による

見通し外イメージングによる事故軽減

課題：分解能・精度：**cm級**＋人体検出が困難



自動運転における各種センサの統合例



独自の画像化法（RPM法）

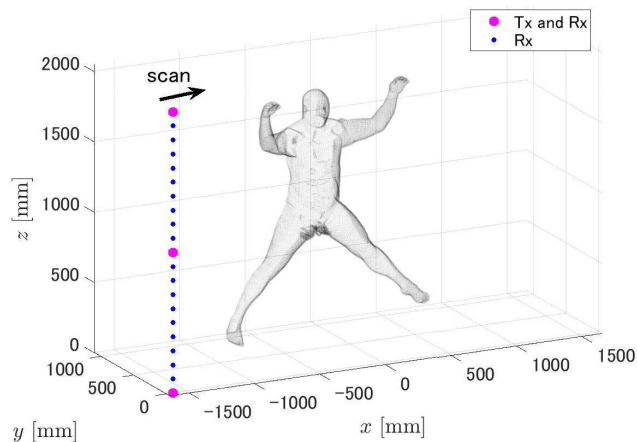
提案法：RPM(Range Points Migration)法 [1,2]

原理：観測される距離点(Range point)を反射点に写像（インコヒーレント処理）
（ガウスクERNEL密度推定による統計的アプローチ）

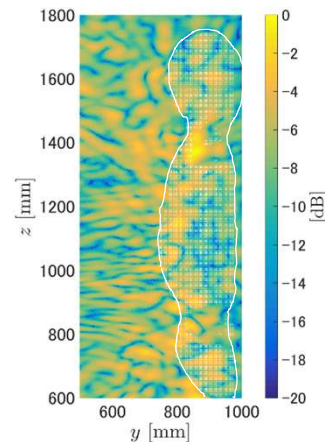
→ 距離と方向のJoint問題をほぼ完全に解決

主な性能・精度：1/100波長・分解能：1/10波長
・高速処理（3次元問題：数秒程度）

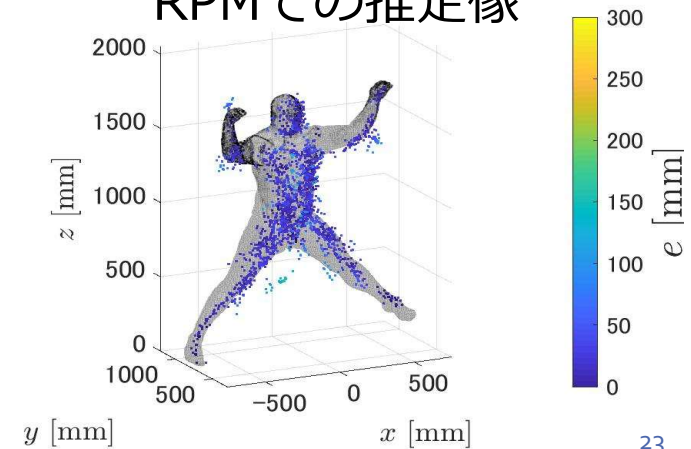
観測モデル



CIでの推定像



RPMでの推定像



多重散乱波イメージング

複数・複雑目標の場合：
多重散乱波が存在⇒虚像の要因

逆転の発想

多重散乱波：
複数散乱点の位置情報を有する



目標再現範囲を拡大
(仮想素子による開口面積拡大)

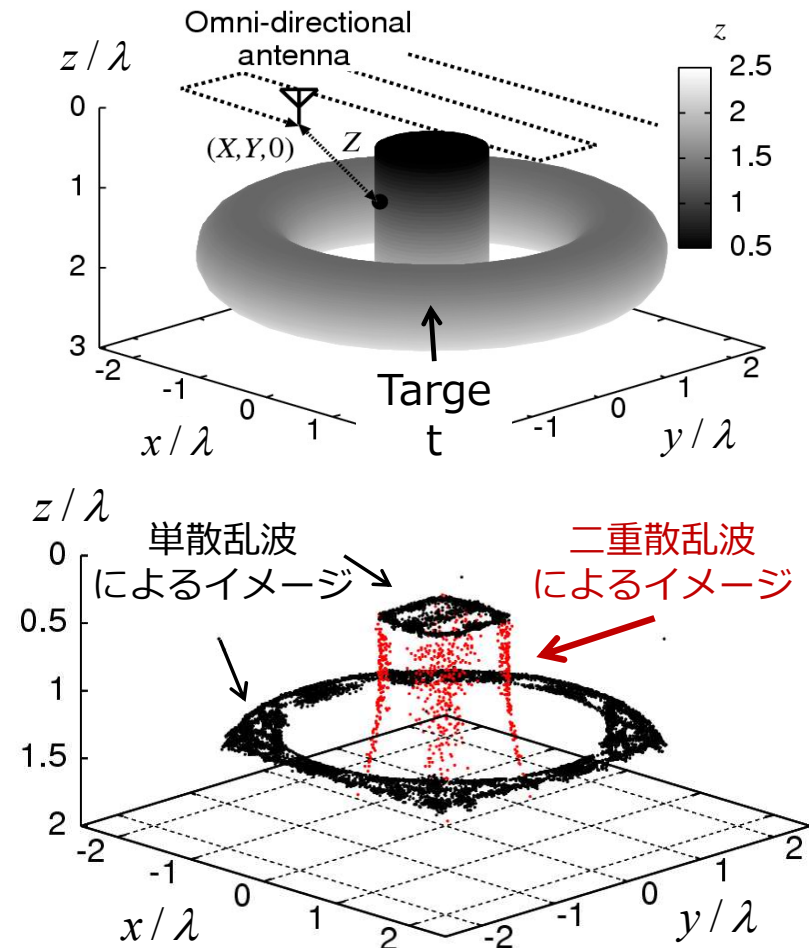
RPM法 + 多重散乱波合成

⇒従来再現できなかった領域の
イメージングに成功

(S. Kidera et. al., *IEEE Trans. GRS*, 2011.)

処理時間：

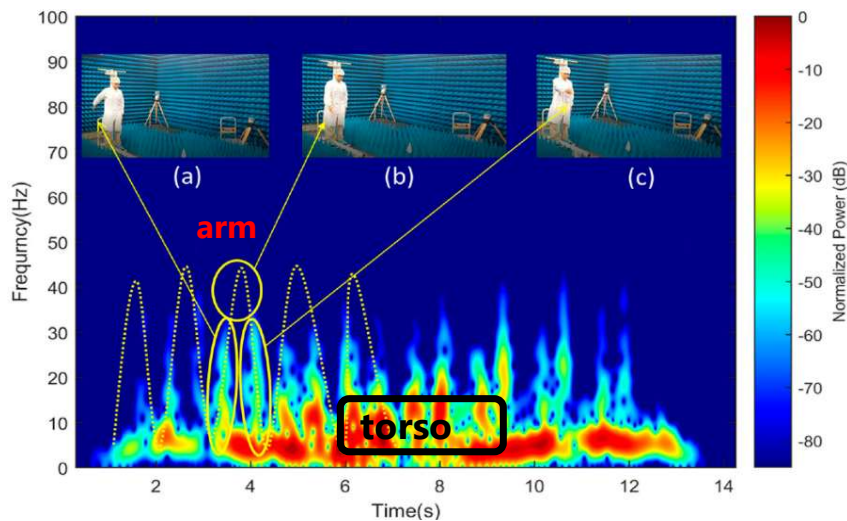
SAR：約10万秒 RPM：約10秒



ドップラ速度分離による高分解能化

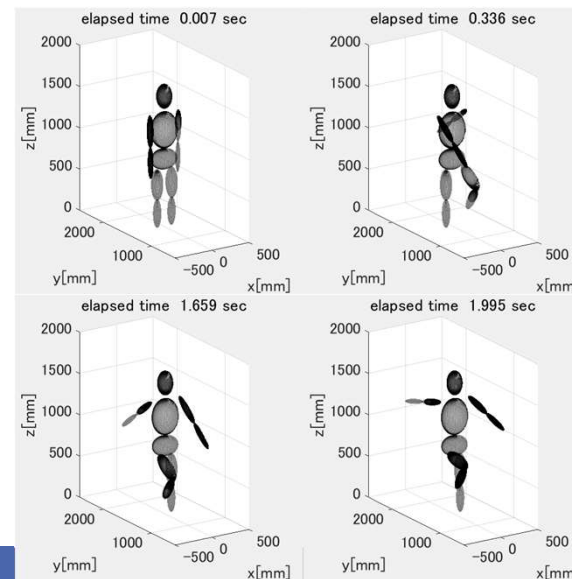
レーダの特徴：対象の**ドップラ速度**を高分解能・高精度に推定可能
⇒歩行者の各部位の動きに起因する**マイクロドップラ**によるレーダ画像解析

提案技術：**マイクロドップラ解析+イメージング**による人体識別
⇒ 多元的な情報の統合による目標識別の高精度化

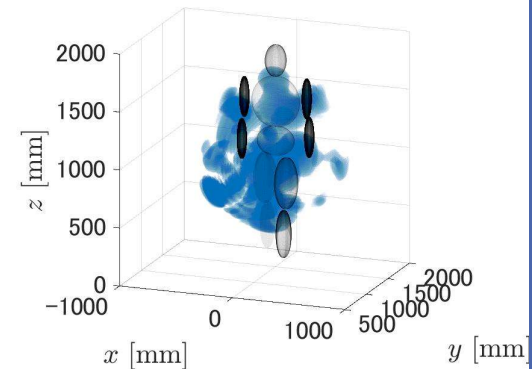


人体検知のための時間周波数解析^[1]

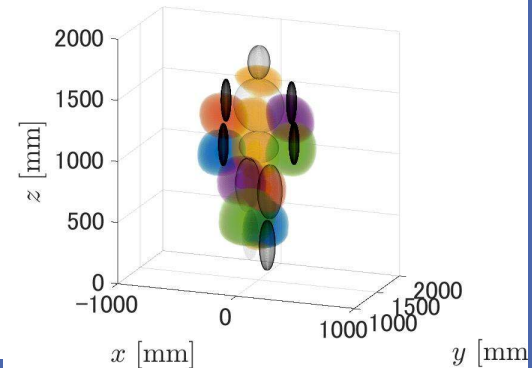
人体歩行モデル



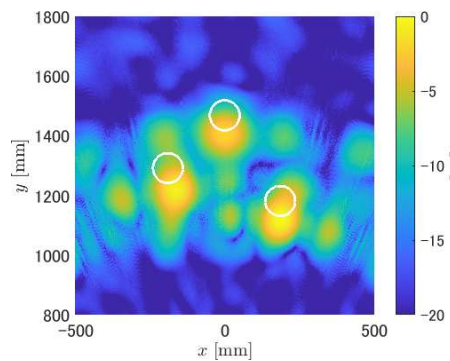
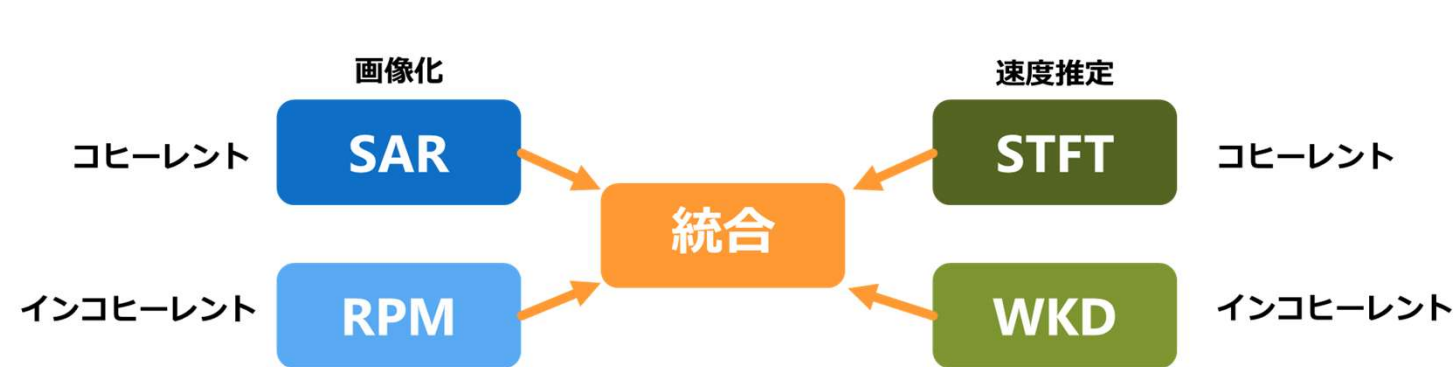
従来のレーダ画像



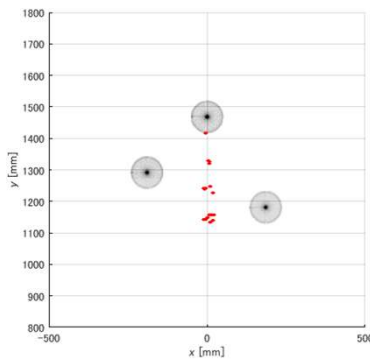
レーダ画像+ **ドップラ分解**



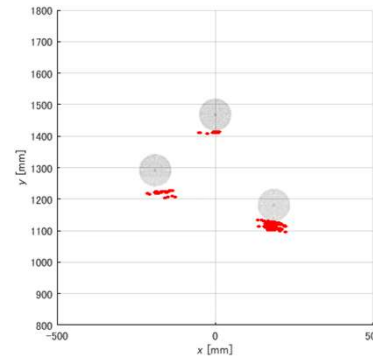
コヒーレント/インコヒーレント統合によるミリ波イメージング



SAR

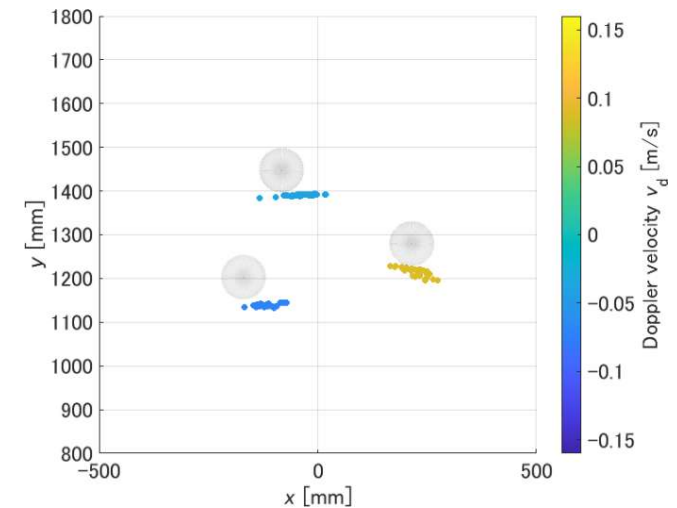
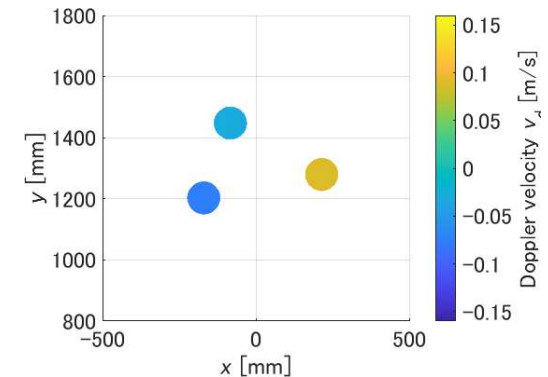


RPM



STFT+SAR+RPM

真の速度・画像分布



ドップラ速度とRPM画像の統合
(STFT+SAR+RPM+WKD)

コヒーレント(SAR,STFT)+インコヒーレント処理
(RPM,WKD)の統合+速度と画像の統合を実現

T. Ando *et al.*, *IEEE JSTARS*, 2022

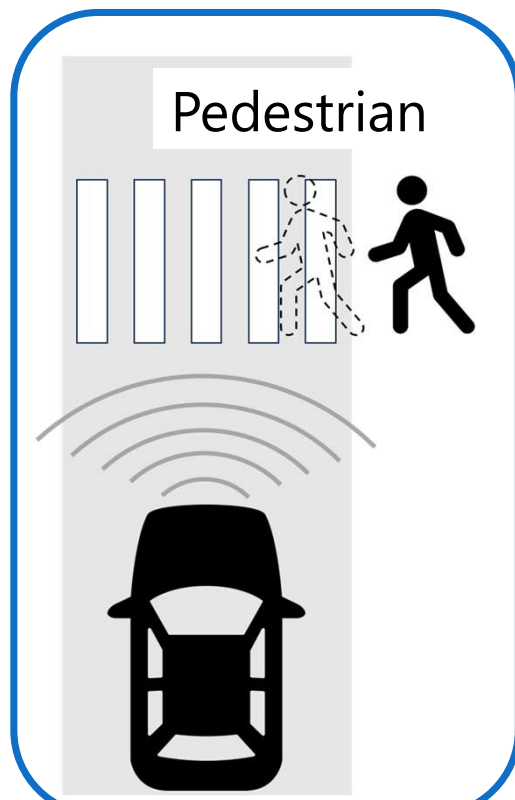
見通し外領域の目標識別

車載レーダの必要性

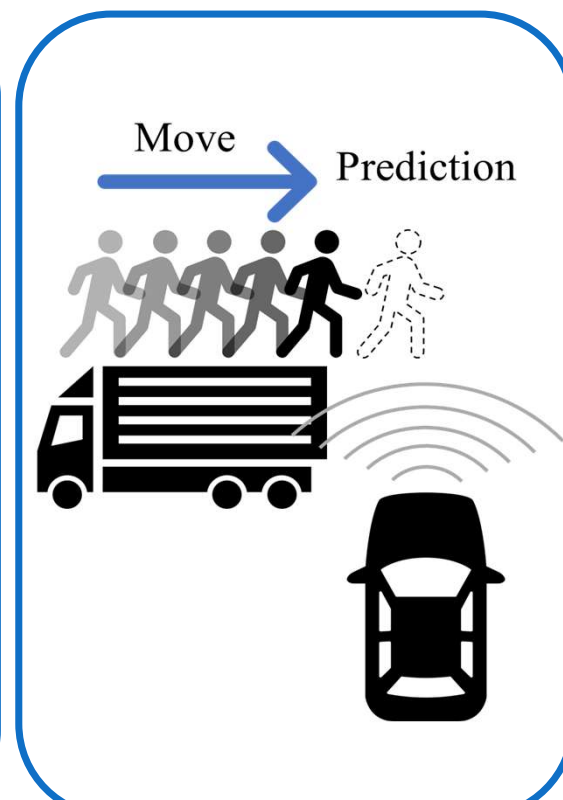
→ 回折波 及び 多重散乱波による

見通し外イメージングによる事故軽減

見通し内環境



見通し外環境



回折波及び多重散乱波
による死角領域イメージング

ミリ波レーダデータの機械学習に基づく人体識別

- **電波暗室**において車両による遮蔽
見通し外に人体と円柱を配置
- 24 GHz 帯MIMOレーダ（市販製品）
による回折信号の取得

静止人体と人口構造物との
決定的な違いを発見！

SVMによる識別精度（遮蔽100%,距離:10 m）

• 静止人体と金属円柱：**80%**

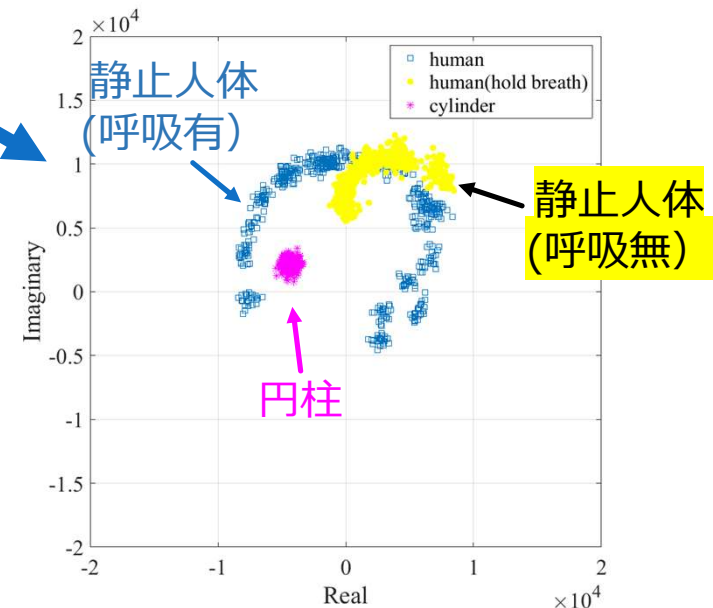
完全な見通し外環境下で人体と円柱を80%以上で識別！
⇒ ミリ波レーダ分野において極めてインパクトが大きい成果
進行中のプロジェクト：

JST 創造的研究支援事業，共同研究 マツダ

車両見通し外実験環境

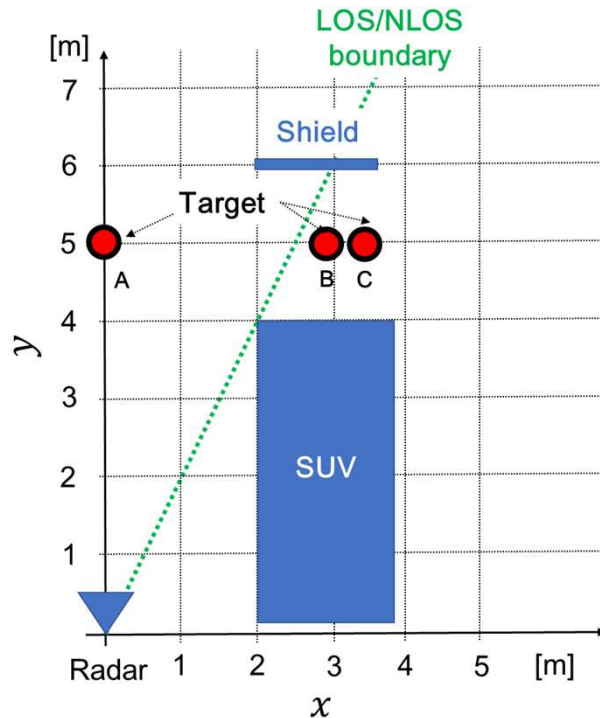


各目標のレーダ複素信号



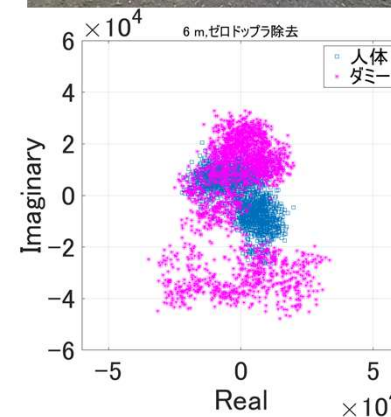
多重散乱環境を利用した識別

- FMCW radar:
中心周波数 : 24 GHz
帯域幅 : 200 MHz
($\Delta R = 75\text{cm}$)
- ビーム幅:
水平 : ± 45 度
垂直 : ± 6.5 度

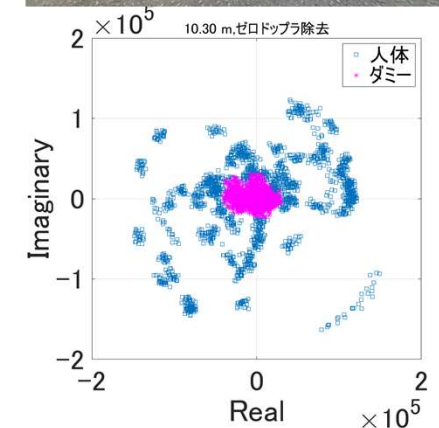


	識別精度	
	Feature 3 (Time shift)	Feature 4 (STFT)
後方シールドなし	66%	61%
後方シールドあり (多重散乱)	100%	87%

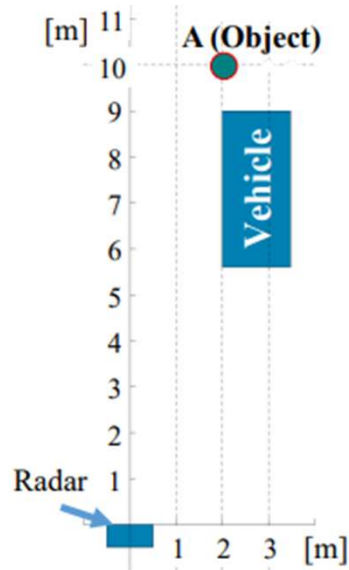
後方シールドなし



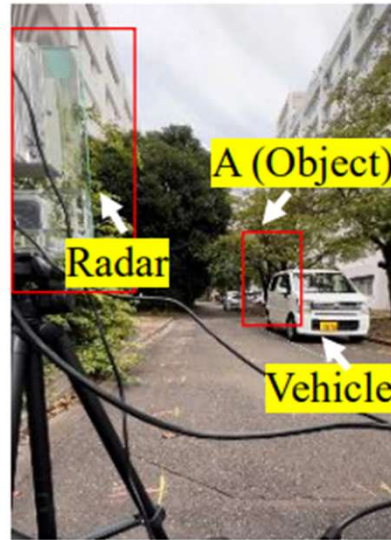
後方シールドあり
(多重散乱)



レーダ画像（遮蔽なし）

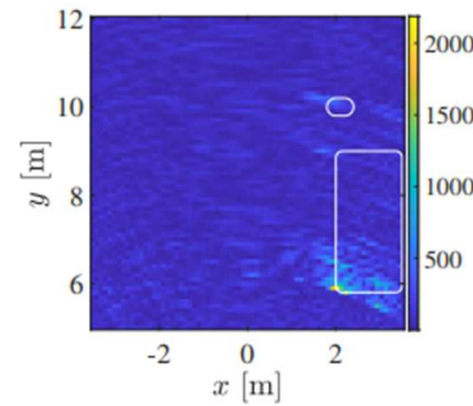


(a) Geometry.

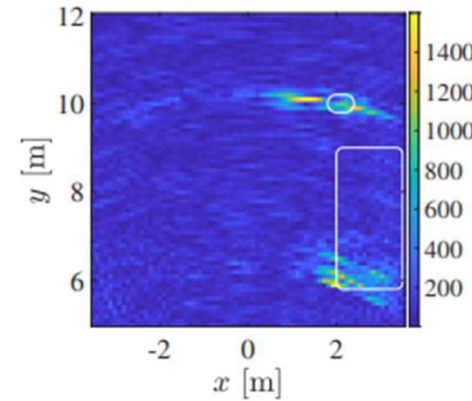
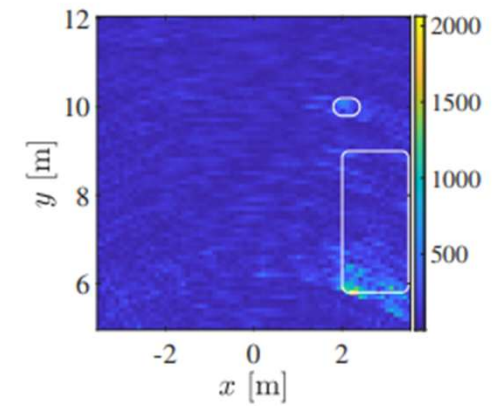


(b) Scene.

	Data length	レーダ画像なし	レーダ画像あり
Feature 1 (Raw)	-	56.6 %	85.6 %
Feature 2 (Time derivative)	-	49.7 %	85.6 %
Feature 3 (Time shift)	10	83.1 %	99.8 %
	50	91 %	100 %
Feature 4 (STFT)	10	82 %	94.7 %
	50	85.2 %	100 %

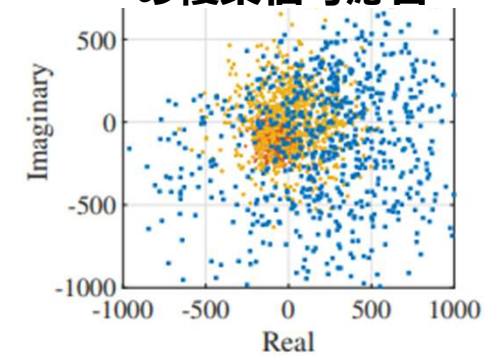


(a) Dummy



(c) Cyclist

自転車 歩行者 ダミー
の複素信号応答



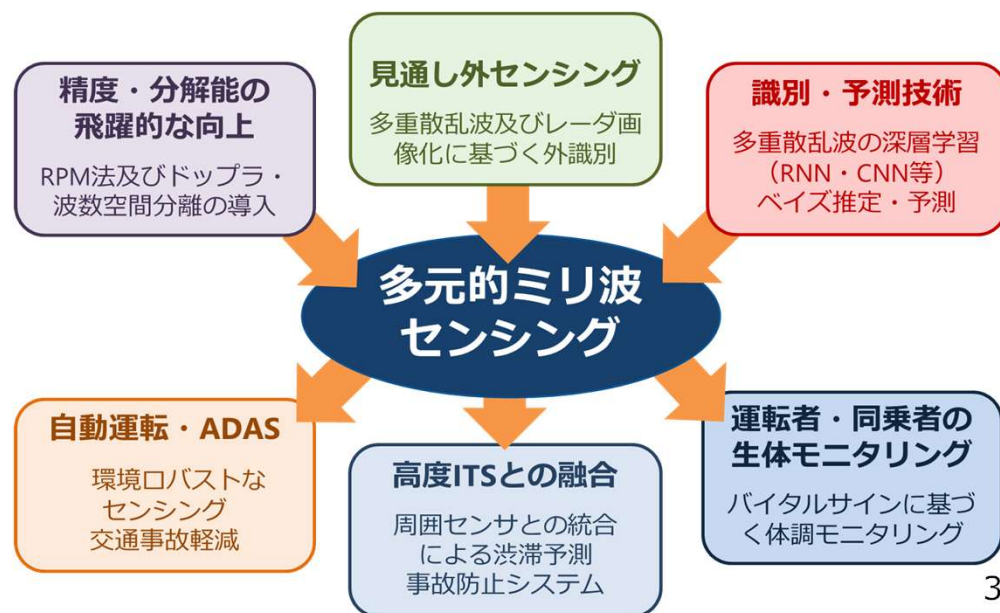
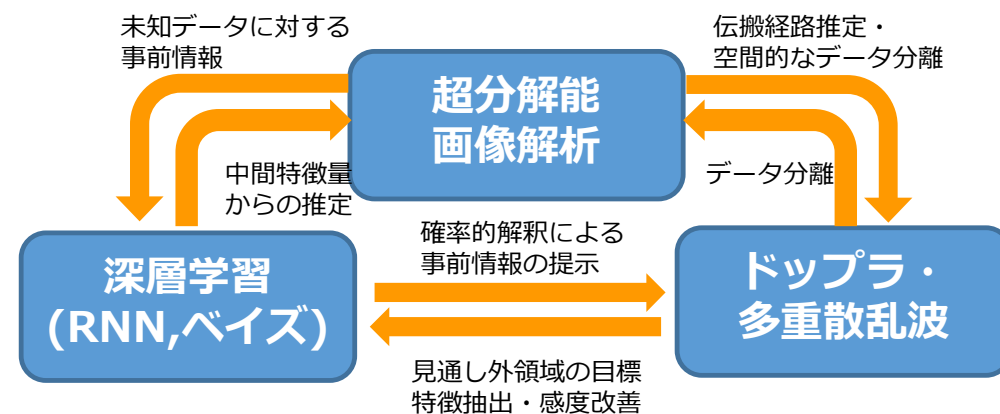
(d) Scattered plot

将来的な展開

自動運転・ADASのみならず、

- 高度ITSとの融合による交通量モニタリング
⇒ 渋滞予測, 事故防止システム
- 運転者・同乗者のバイタルサインモニタリング
⇒ 運転者の精神状態（過度の緊張, 眠気等）や同乗者の状態（体調不良等の検出）の把握
多様な応用に展開する

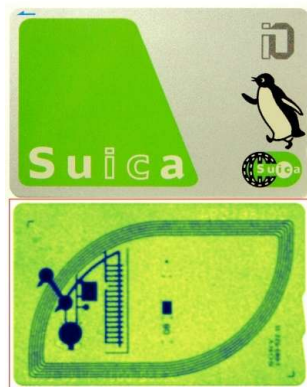
高度ITSとの融合



テラヘルツ波帯への拡張

- 波長：100 μm (3THz) →高い空間分解能(数百 μm 級)
- 数mm程度の透過性 (皮膚表層, 薄い誘電体膜を透過)
- 分光処理により物質固有の吸収スペクトル

➡ 非破壊イメージング技術 (異物検査、セキュリティ等)
化学分析 (医薬品検査、薬物検査等)



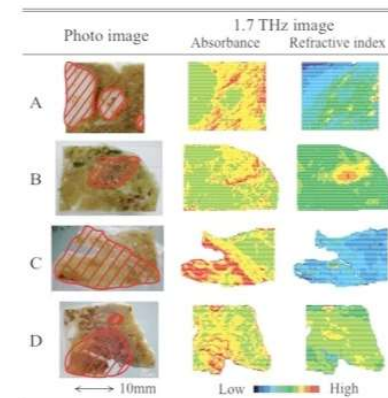
周波数 : 0.6 THz (波長0.5mm)

空間分解能 : 0.5 mm

Dobroiu et al., *Applied Optics*, 43, 5367 (2004)



禁止薬物検査
農薬検査



皮膚癌・乳癌診断・病理診断

分光RPM法の開発

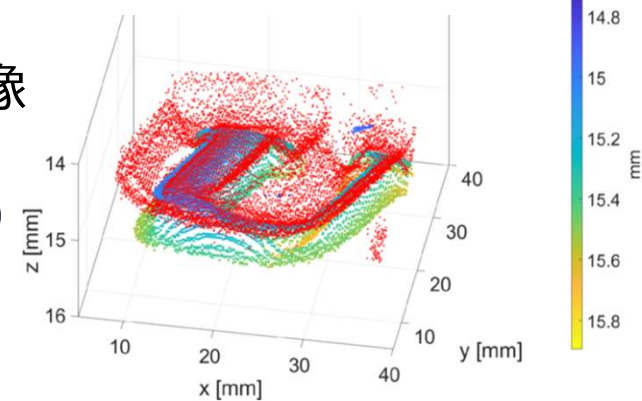
従来のテラヘルツイメージング法：
集光レンズによりターゲット位置で結像
→2次元走査により3次元画像化

- ・ 分解能：回折限界 (3THz:150 μ m)
- ・ 結像位置以外では分解能劣化

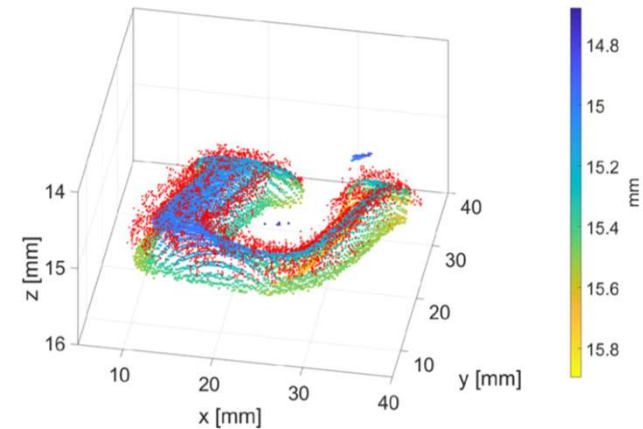
THzデータ解析法：
集光・結像を信号処理で実現
共焦点法・RPM法を導入

データ統合による高次イメージング：
・ 分光イメージング
→**吸収スペクトルからの物性識別**

従来のTHz立体画像



RPM法によるTHz立体画像



産学官連携

産

非公開情報

学

- 電気通信大学（石垣教授, AWCC : Spectrum-Nexus）
- Wisconsin-Madison 大学（乳癌検知レーダ）
- 土木研究所（コンクリート非破壊検査）
- 広島大学（吉川教授）, 広島大学病院

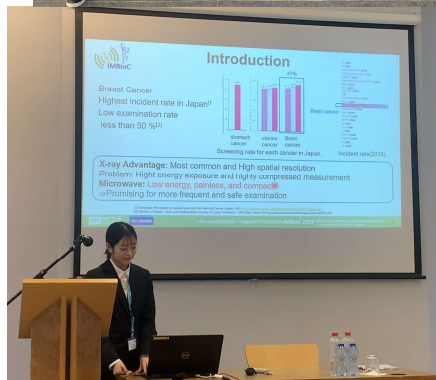
官

- 文部科学省（科研費）・国土交通省（非破壊検査）
- 総務省（140GHzレーダ, SCOPE）
- 科学技術振興機構(JST)（さきがけ, 創発）
- 公益財団等（20件以上）

モチベーション：学会発表

研究（実験・プログラミング・アルゴリズム開発）

⇒成果 ⇒ **学会発表（国内・国外）** ⇒ 学術誌論文



学生の研究成果

学部生・大学院生の指導実績（UEC着任16年目）

学部生：39名，博士前期：33名，博士後期：3名

指導学生の実績（学生が第一著者分）

学術雑誌への論文掲載（IEEE：40件以上，IEICE：40件以上）

国際会議発表（150件以上），国内学会発表（160件以上）

国際会議論文賞（20件以上），目黒会賞（6名）本学学生表彰（20名以上）



研究室詳細

教員：木寺 正平（教授）

経歴：2009年にUECに着任(E→M), 2014年9月にI専攻に異動

研究室：西2号館 601,605,607,609号室

2025年度の構成員：D:2名, M2:3名, M1:5名, B4:4名, 秘書:1名

イベント：夏の合宿（避暑地）、スポーツイベント等



計算機環境

計算機：

PC：Dell Power Edge：15台, Precision T7600, T5400 (Workstation)：多数

GPU搭載並列計算機：→ 深層学習・大規模電磁界解析(FDTD等)に使用

サーバ	機種	メモリ	CPU	コア数	スレッド数
40	R750	2 TB	Intel Xeon Gold 6330 x2	56	56
41	R750	1.5 TB	Intel Xeon Silver 4309Y x2	48	96
42	R750	256 GB	Intel Xeon Silver 4416+	40	80
43	R760	1 TB	Intel Xeon Gold 5418Y	48	96
44	R730	128GB	Intel Xeon E5-2680 v4	28	56
50	R740	768GB	Intel Xeon Gold 6130	32	64
54	R440	384GB	Intel Xeon Silver 4110	16	32
57	R740	512GB	Intel Xeon Silver 4110	16	32
64	R740	1 TB	Intel Xeon Silver 4210	20	40
65	R740	1 TB	Intel Xeon Silver 4210	20	40
68	R840	3 TB	Intel Xeon Gold 5218 x4	64	128
69	R750	0.5 TB	Intel Xeon Gold 6330 x2	56	56
70	R750	2 TB	Intel Xeon Gold 6330 x2	56	56
71	R750	2 TB	Intel Xeon Gold 6330 x2	56	112
78	R750	1 TB	Intel Xeon Silver 4309Y x2	16	32

学外（自宅等）からリモートで
多数のサーバにアクセスして
効率的に作業することが可能

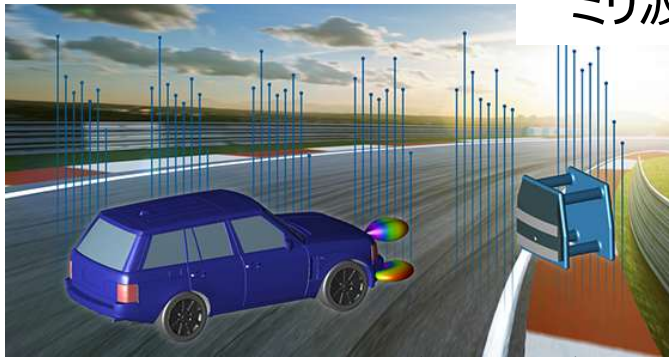


計算機環境

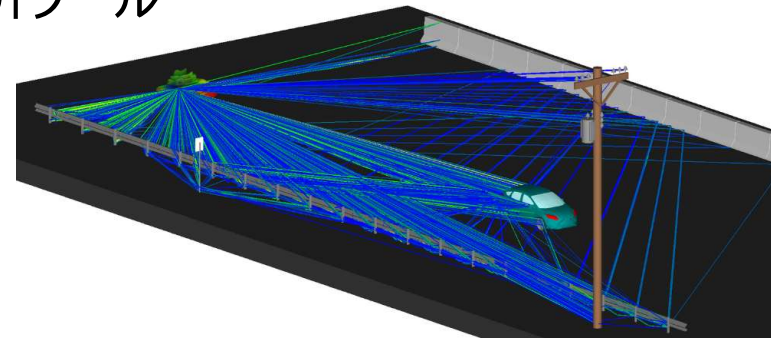
電磁界解析ソフトウェア：

XFDTD BioPro, Wireless Insight, XGTD, Wavefarer 等：複数ライセンスを保持

ミリ波解析ツール



<https://ja.remcom.com/press-releases/2018/11/07/remcom-announces-wavefarer-automotive-radar-simulation-software-for-drive-test-scenarios>

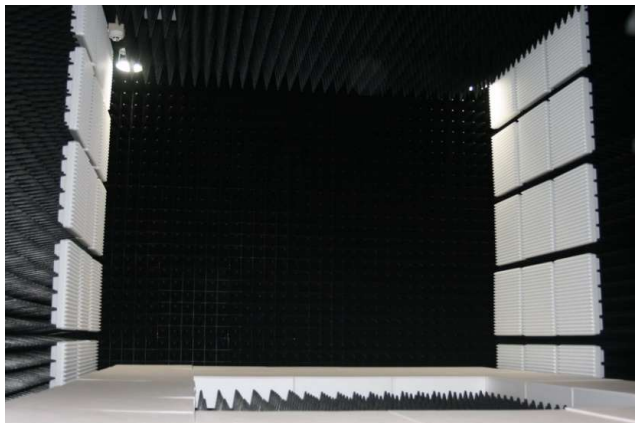


XFDTD BioPro による生体内電磁波シミュレーション



実験設備 (W2-609, W11-301, 107, 地下暗室)

電波暗室



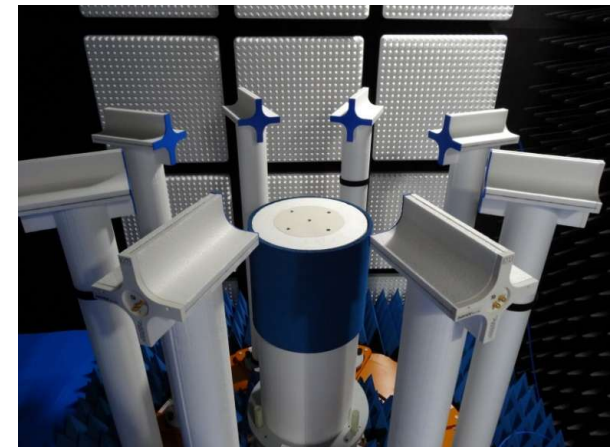
マイクロ波マンモグラフィ装置



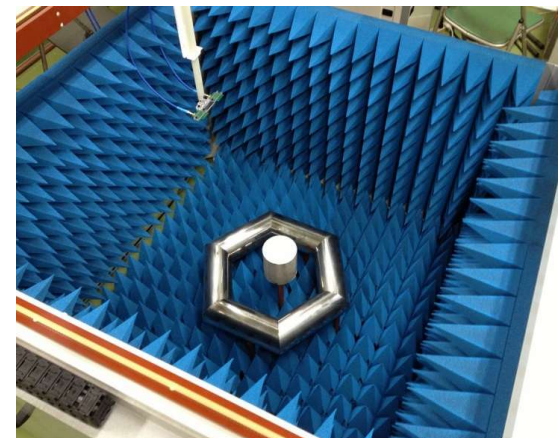
人体ファントム

ミリ波MIMOレーダ
(24GHz, 79GHz)

マルチスタティックレーダシステム



3次元走査システム



卒業生の進路

学部生：

進学：電通大，東工大，東大等

就職：キヤノンマーケティングジャパン、セコムトラストシステムズ、アンリツ、キオクシア等

大学院生：

進学：電通大（博士課程）

就職：東芝，NEC，村田製作所，川崎重工業，TDK，三菱電機，日立製作所，NTTコムウェア，NTTデータ，ソニーセミコンダクターソリューションズ，東北電力，キヤノン，富士通，コニカミノルタ，日本放送協会（NHK），日立ハイテク，日本航空電子工業，デンソーテクノ，リコー，矢崎総業，マーベラス，キャップジェミニ，アンリツ，フューチャーアーキテクト，ルネサスエレクトロニクス 等