

# Wi-Fi CSI を用いたヒトセンシング

## Human-body sensing using Wi-Fi CSI

本間 尚樹

Naoki HONMA

岩手大学 理工学部

### 概要

ISAC (Integrated Sensing And Communication) は、通信とセンシングを融合することで周波数リソースやハードウェアを共有するものである。しかしながら、両者の要求条件は大きく異なるため、実装にはさまざまな課題が存在する。本報告では、ISAC の一例として、著者の検討する Wi-Fi を用いたヒトセンシング技術について紹介する。送受信機間のクロック誤差の影響を回避するため CSI の振幅情報のみを用い、微弱なマイクロドップラー成分を抽出・解析することで、デバイスフリーなヒト測距を実現する。実験により、中央値で 1.38 m の誤差で測距が可能であることを明らかにする。

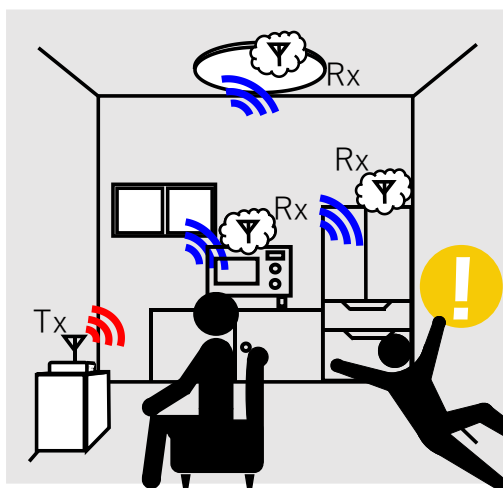


図 Wi-Fi ヒトセンシングの利用イメージ

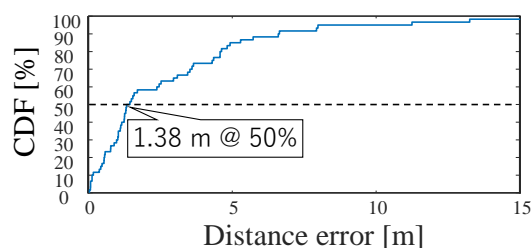


図 実験による測距誤差評価

### Abstract

ISAC (Integrated Sensing And Communication) is the fusion of communication and sensing to share spectral and hardware resources. However, the system requirements for communication and sensing are quite different, and there are various challenges in implementing ISAC. In this report, the author introduces a human sensing technology using Wi-Fi as an example of ISAC. Only the amplitude information of CSI is used to avoid the influence of clock errors between transmitters and receivers, and the low-level micro-Doppler component is extracted and analyzed to realize device-free human ranging. Experimental results show that the presented technique realizes human-body ranging with a median error of 1.38 m.

Microwave Workshops & Exhibition

**MWE 2024**

Nov.27-29, 2024, Pacifico Yokohama, JAPAN

TH1A ワークショップ

通信とセンシングの融合技術

Integrated Sensing and Communication Technologies

# Wi-Fi CSIを用いたヒトセンシング

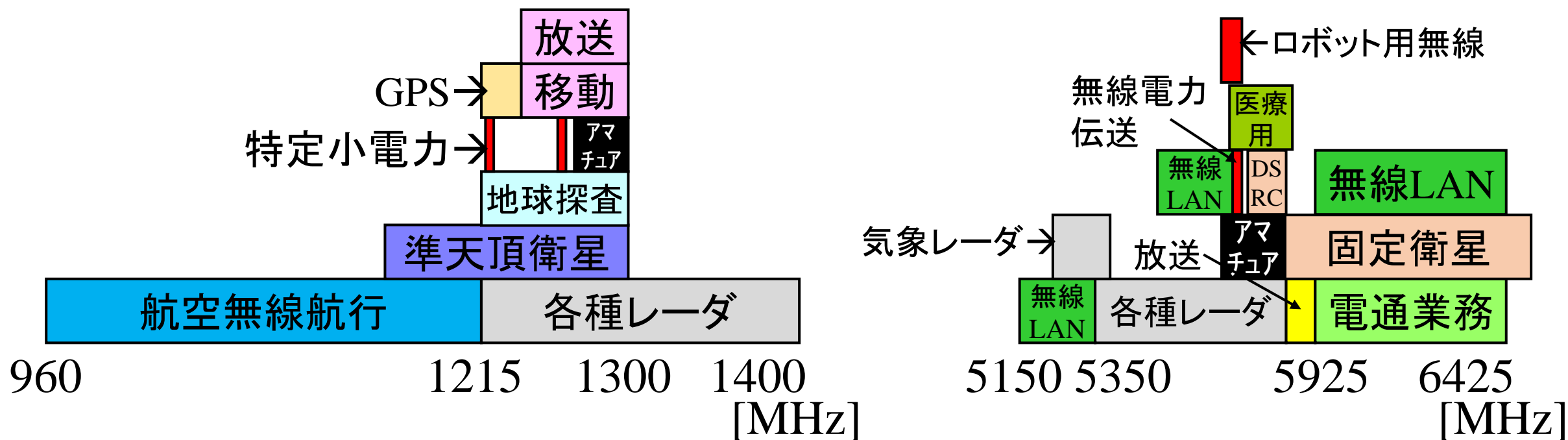
本間 尚樹

岩手大学 理工学部

- ISACが求められる背景
- Wi-Fiを用いたヒトセンシング
- 実験結果
- まとめ

# ISAC (Integrated Sensing And Communication) とは

## ■ 無線通信とセンシングの共存 我が国の周波数利用状況<sup>[1]</sup>



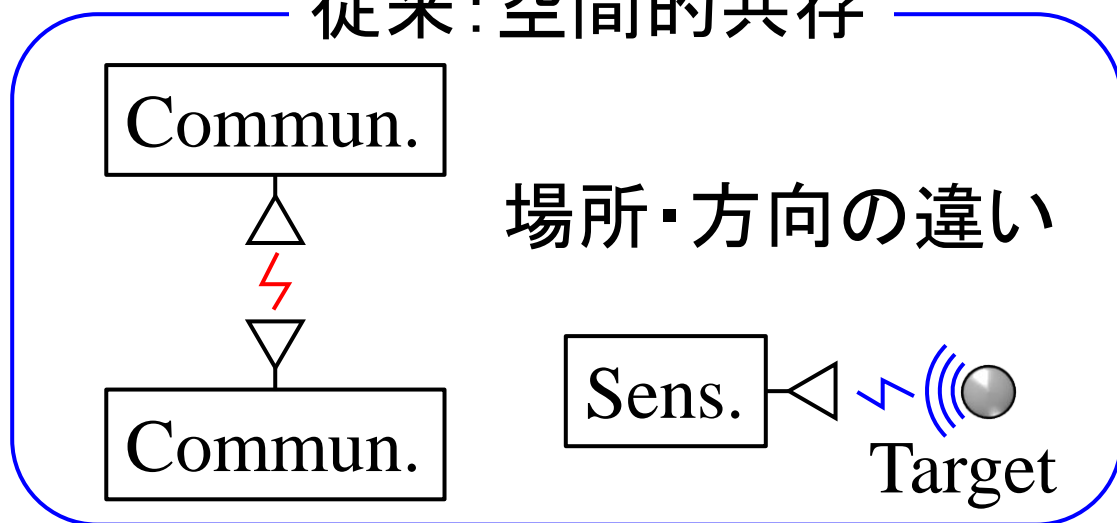
同じ周波数を様々なシステムが共用

[1] 総務省電波利用ホームページ: <https://www.tele.soumu.go.jp/index.htm>

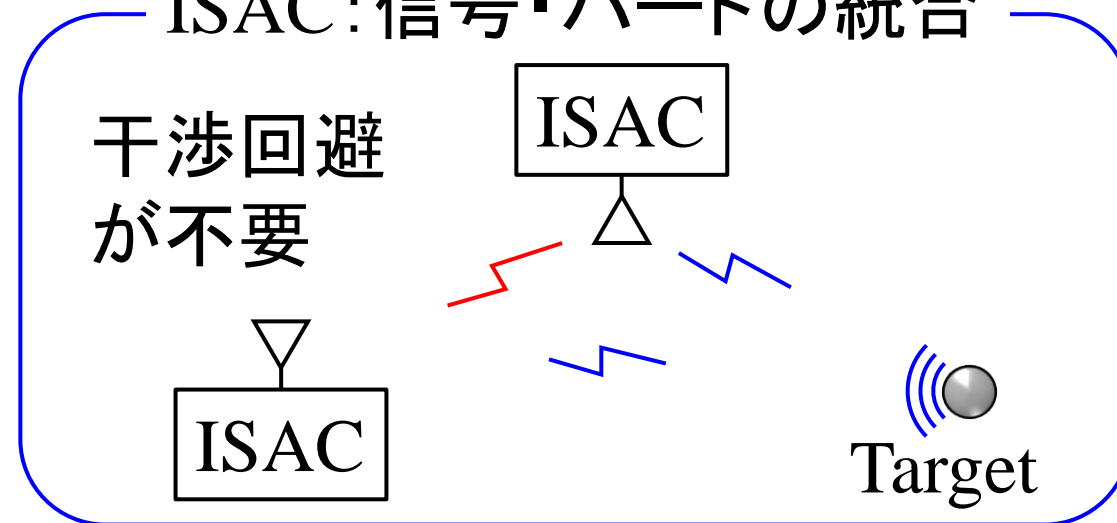
# ISAC (Integrated Sensing And Communication) とは

## ■ 無線通信とセンシングの共存

従来: 空間的共存



ISAC: 信号・ハードの統合



ハードウェアや周波数資源の共用

# ISAC (Integrated Sensing And Communication) とは

## ■ 通信システムへのセンシングの導入検討

### ■ 無線LAN (IEEE802.11)

■ 802.11az, bk (通信可能な) 端末の測位

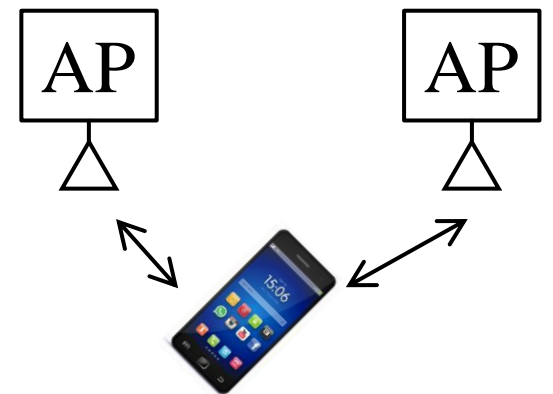
■ 802.11bf CSI (Channel-State-Information) を使ったセンシング (対象は色々)

### ■ Beyond 5G, 6G

#### ■ IMT-2030 Framework 新勧告案

Positioning 端末位置推定

Sensing 物体 (ヒトなど) 位置推定を含む



標準化や方式検討が進んでいる

# ISAC (Integrated Sensing And Communication) とは

## ■ 無線通信とセンシングの違い: 感度・ゲイン

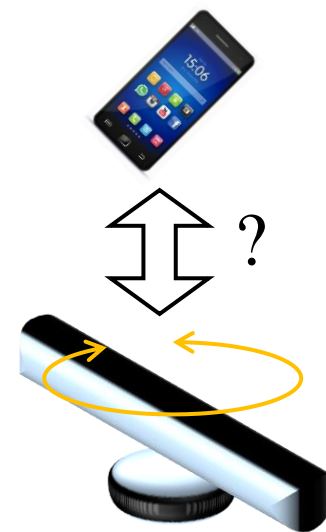
- ダイナミックレンジ Analog-to-Digital Converter (ADC) ビット深度
  - 無線LAN 8~10 bits → 48 dB ~ 60 dB
  - 衝突防止レーダ 12~16 bits → 72 dB ~ 96 dB

民生用でも50 dB程度の違いが存在

## ■ アンテナ性能

- セルラ(端末) -10 dBi? (Sub 6)~ 数 dBi? (28 GHz)
- 船舶用レーダ 20 dBi (typ.)

用途によって様々



ハードウェアの要求条件が大きく異なる場合がある

# ISAC (Integrated Sensing And Communication) とは

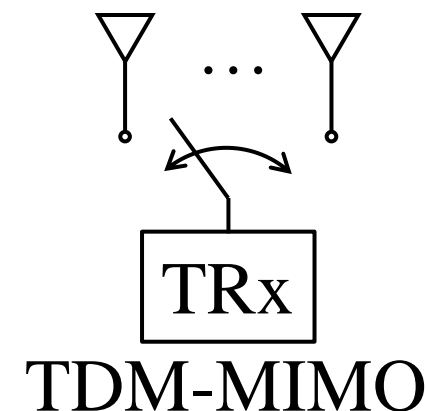
## ■ 無線通信とセンシングの違い：帯域・速度

### ■ 周波数・帯域幅

	方式	中心周波数	RF帯域幅	ベースバンド(IF)帯域幅
ミリ波無線LAN	IEEE802.11ay	60 GHz	8.64 GHz	8.64 GHz
衝突防止レーダ	FMCW	79 GHz	4 GHz	5-15 MHz

### ■ アンテナ切替

	アンテナ数	切替間隔
ミリ波無線LAN	8 × 8 ?	無し(同時) (MU*-MIMO**)
衝突防止レーダ	4 × 3 or more	30 $\mu$ s (TDM***-MIMO**)



**センシングでは周波数や空間リソースの同時使用が不要**

\*MU: Multi-User, \*\*MIMO: Multiple-Input Multiple-Output, \*\*\*TDM: Time-Division-Multiplexing

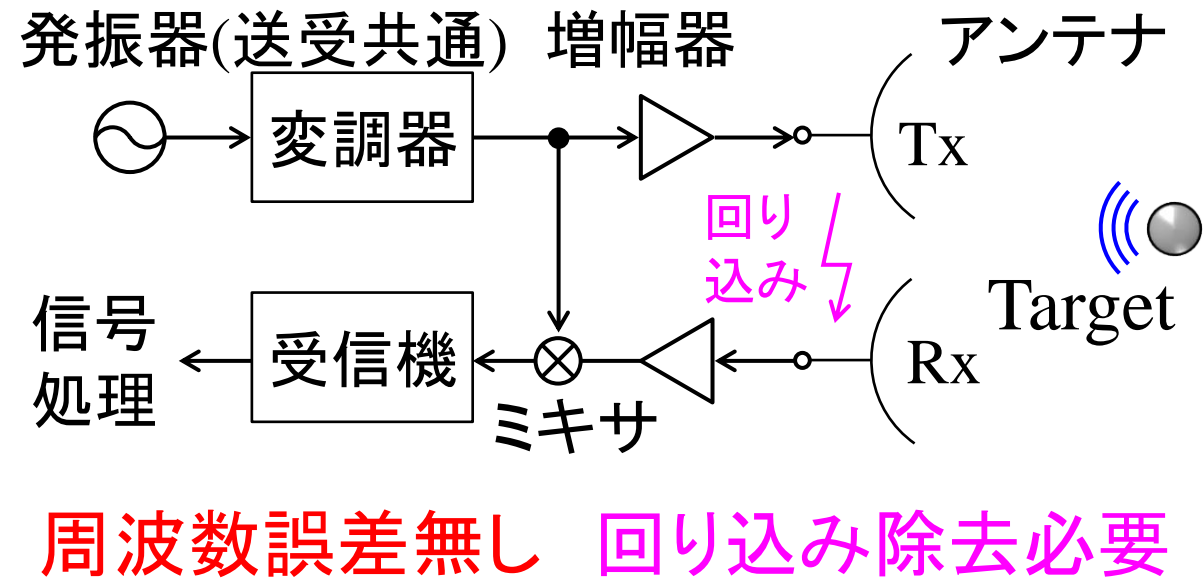
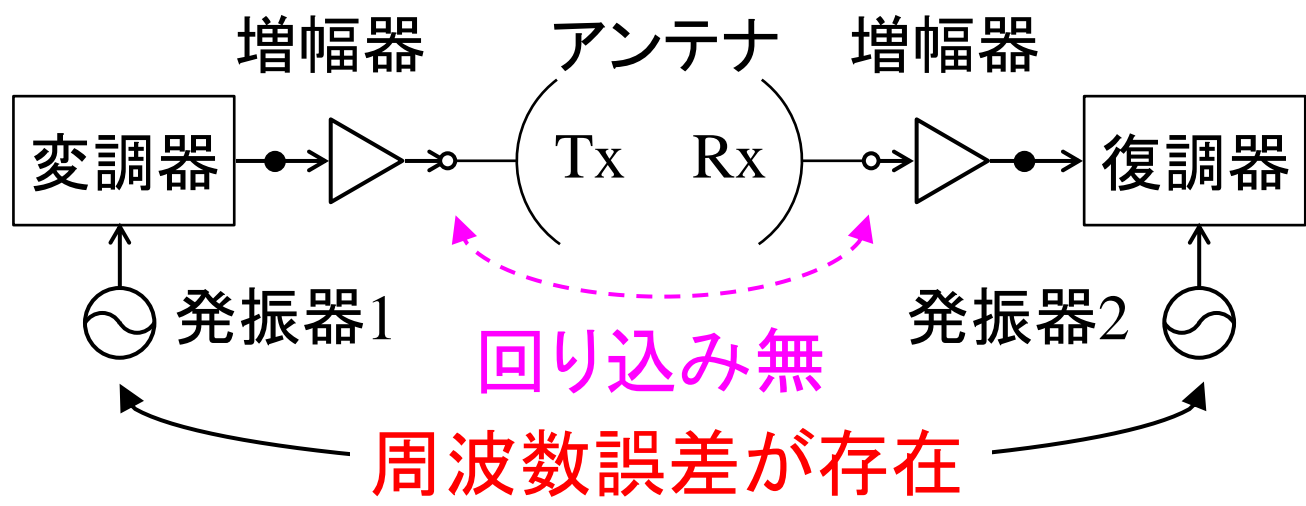


# ISAC (Integrated Sensing And Communication) とは

## ■ 無線通信とセンシングの違い: 送受信配置と同期

通信: バイスタティック

センシング: モノスタティック



そもそも送受信配置が違う, 実装時の問題や対策も異なる

# ISAC (Integrated Sensing And Communication) とは

## ■ 通信とセンシングシステムのどちらをベースに実現するか？

	通信	センシング
ダイナミックレンジ	△ (狭い)	○ (広い)
ベースバンド帯域幅	○ (広い)	× (狭い: FMCW)
MIMO同時送信	○ (必須)	× (不要: TDM)
周波数同期	△ (無)	○ (有)

伝送速度: センシングシステムは通信機能の搭載に致命的な問題  
 → 通信システムのセンシングへの転用が容易？

# ISAC (Integrated Sensing And Communication) とは

## ■ 通信システムベースのISAC

### ■ Bluetooth

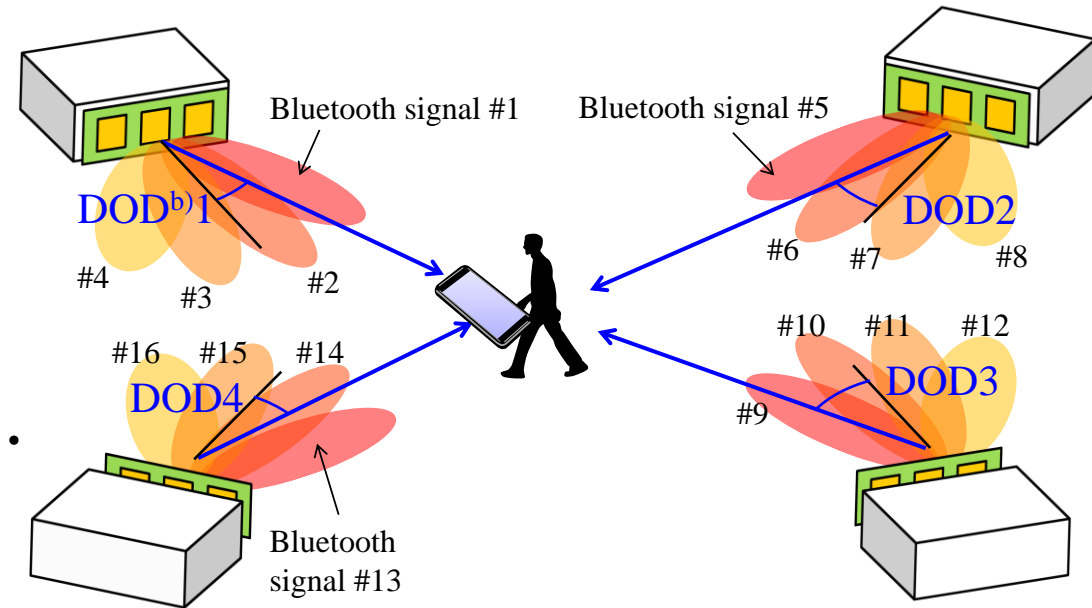
#### 端末位置推定

DoD/AoA based positioning  
Fingerprinting, Machine learning,...

#### デバイスフリー(ヒト)検出

Existence and activity

Positioning (fingerprinting, machine learning)



手軽さから多々検討されている, 帯域や精度に課題

# ISAC (Integrated Sensing And Communication) とは

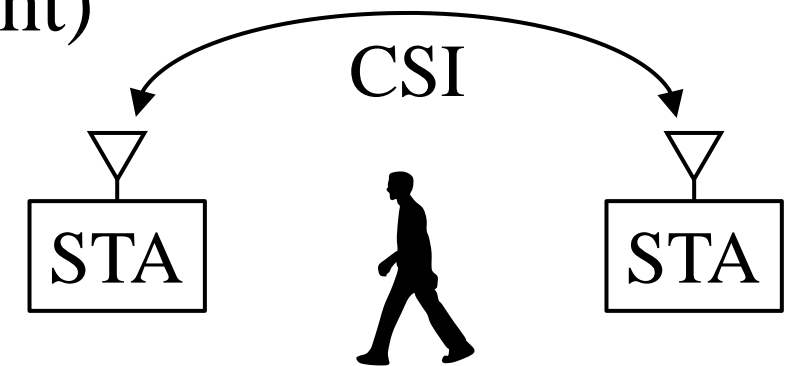
## ■ 通信システムベースのISAC

### ■ 無線LAN (IEEE 802.11)

#### 端末位置推定

802.11mc: FTM (Fine Time Measurement)

→ 測距が可能



#### デバイスフリー(ヒト)検出

802.11bf: WLAN Sensing

→ CSI\* (チャネル情報) をセンシング用に提供

※ センシング対象や具体的検出法は標準化フォーカス外

帯域拡大や仕組みの整備が進み、手軽にセンシングが可能に

# 目次

- ISACが求められる背景
- Wi-Fiを用いたヒトセンシング
- 実験結果
- まとめ

# Wi-Fiを用いたヒトセンシング

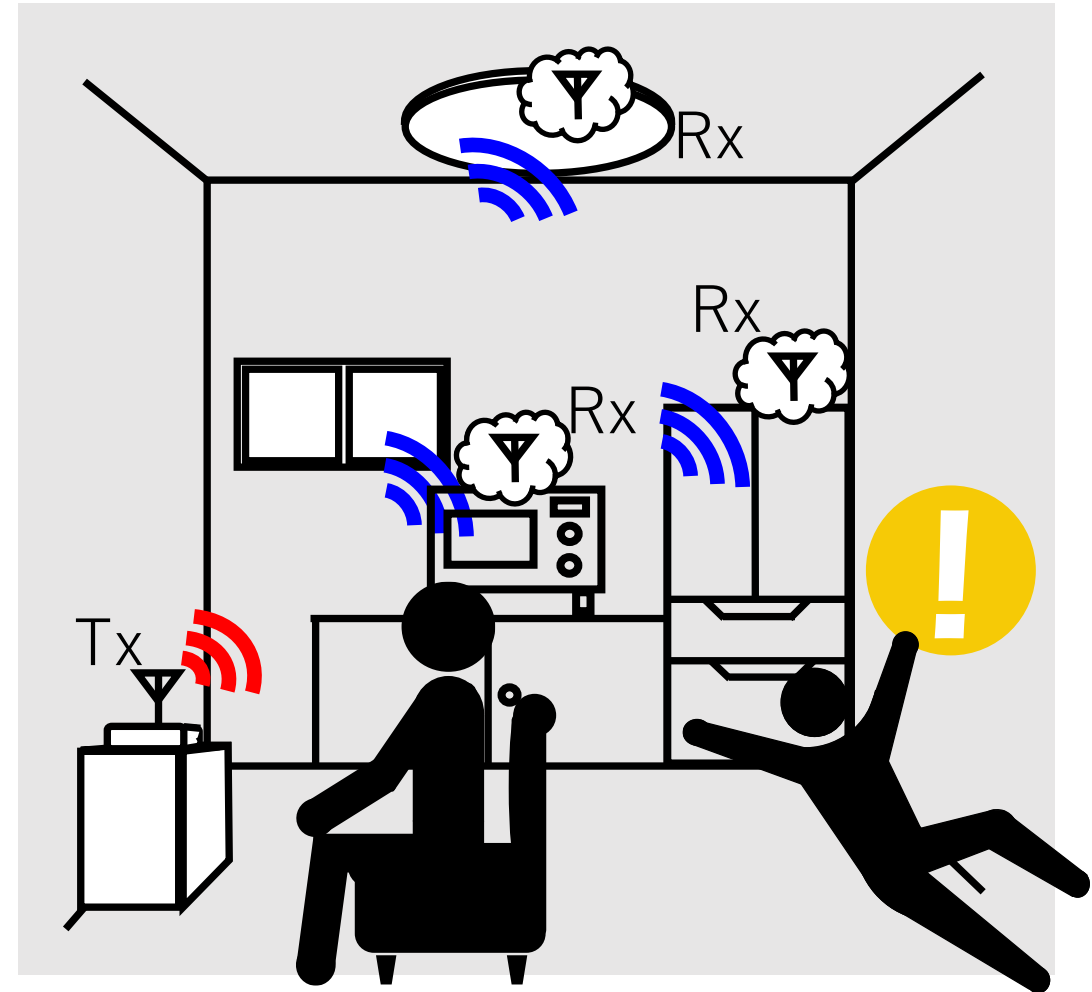
## ■ 生活環境におけるユースケース

- 見守り
- 侵入検出
- 生体認証

## ■ 求められるセンシング項目

- 環境変動
- 位置・距離
- バイタルサイン

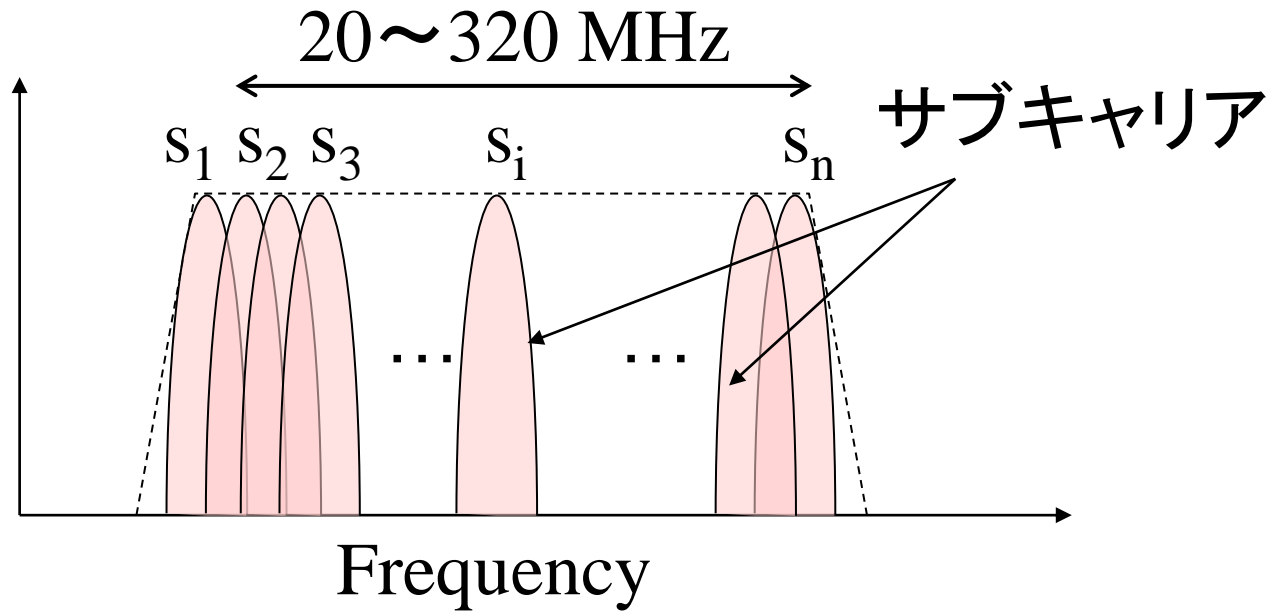
Wi-Fi チャンネル情報 (CSI\*)  
の利用が期待されている



\*CSI: Channel-State-Information

# IEEE 802.11 (Wi-Fi) のCSI

## ■ 無線LANにおけるOFDM\*信号とCSI\*\*



伝搬路情報

- ・位相
- ・振幅

サブキャリアごとにCSI (複素伝達関数) が得られる

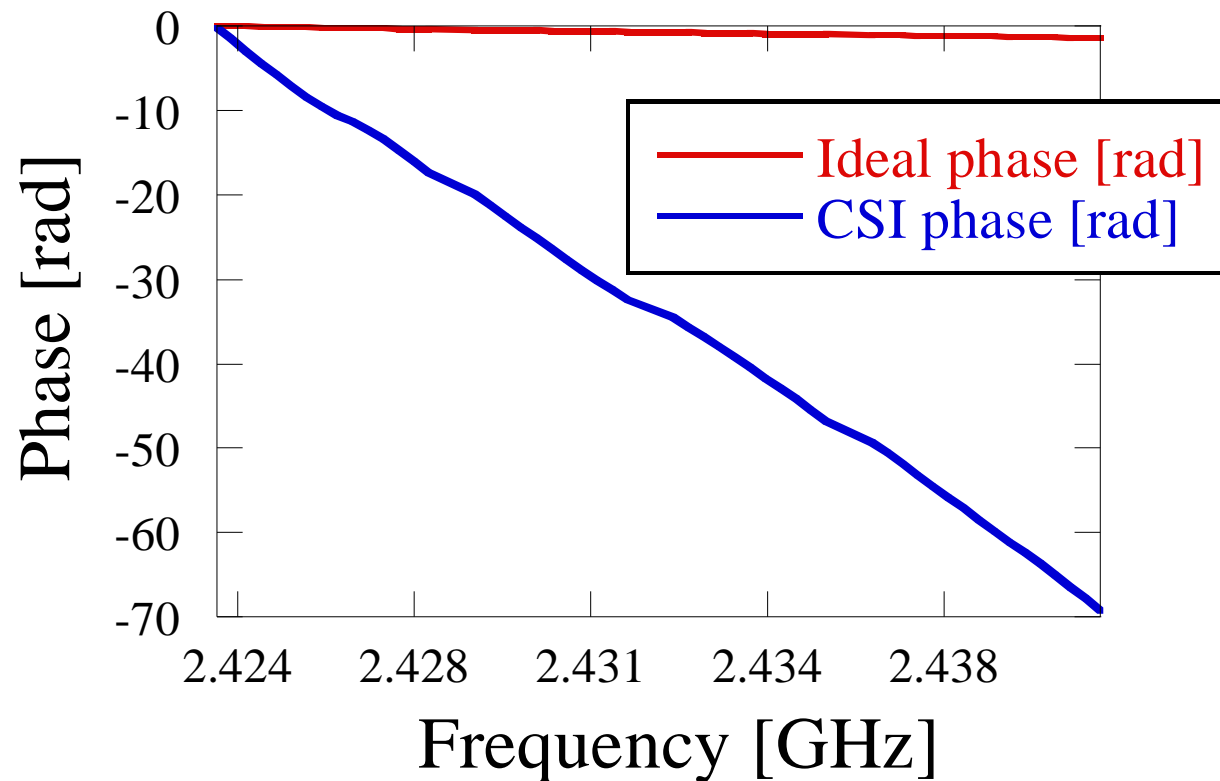
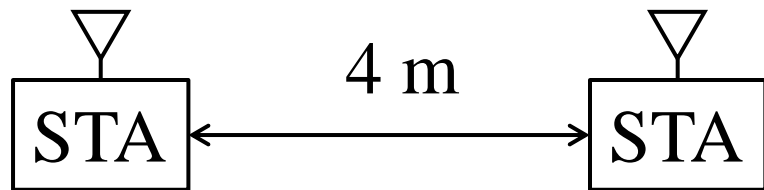
\*OFDM: 変調方式, Orthogonal Frequency Division Multiplexing

\*\*CSI: チャンネル情報, Channel-State-Information

# IEEE 802.11 (Wi-Fi) で得られるCSIの一例

## ■ CSI位相の周波数特性の例 (測定結果)

※ 第1サブキャリアを0とした



**VNA\*のように正しい絶対位相が得られない**

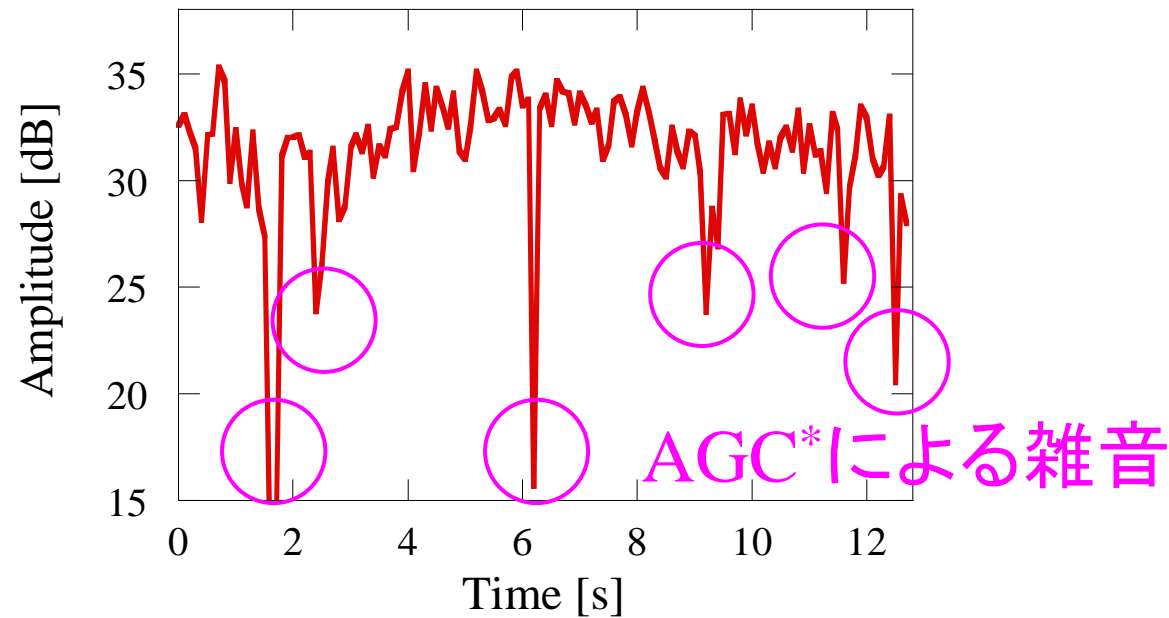
\*VNA: Vector Network Analyzer



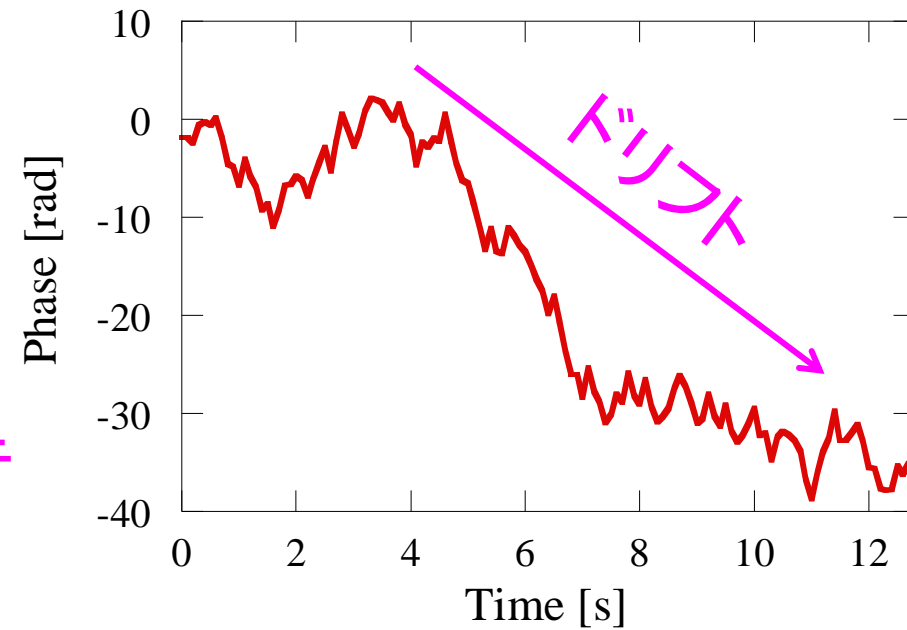
# IEEE 802.11 (Wi-Fi) で得られるCSIの一例

## ■ CSIの時変動特性の例(測定結果)

振幅



位相



ノイズやドリフトが混入し、センシングには不正確な情報  
通信には全く影響しないが、特に位相情報はあてにならない？

\*AGC: Automatic Gain Control

# IEEE 802.11 (Wi-Fi) を用いたセンシングの例

## CSIが理想と乖離：対策方法

- SpotFi (M. Kotaru, K. Joshi, D. Bharadia, and S. Katti, “SpotFi: Decimeter level localization using WiFi,” in Proc. ACM, 2015.)

端末測位

→ Sanitization (CSIの消毒)

- Widar2.0 (K. Qian, et al. “Widar2. 0: Passive human tracking with a single Wi-Fi link,” Proceedings of the 16th annual international conference on mobile systems, applications, and services. 2018.)

デバイスフリーヒト測位

→ CSI cleaning (CSIのクリーニング)

- 3D-BMP法 (X. Yang, “Phase-Calibration-Based 3-D Beamspace Matrix Pencil Algorithm for Indoor passive Positioning and Tracking,” IEEE Sensors J., Vol. 23, NO. 17, 2023)

デバイスフリーヒト測位 (Broadcom bcm4366専用)

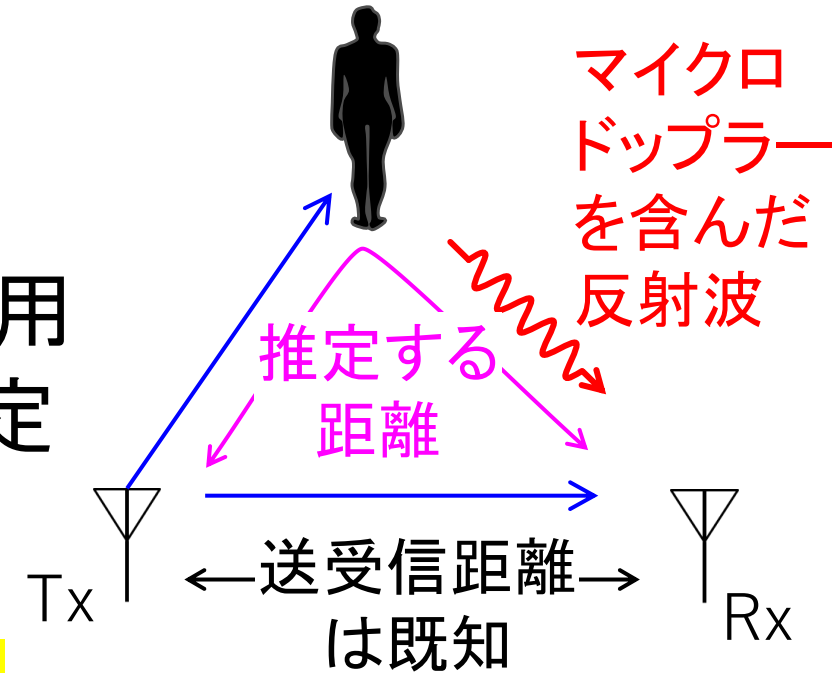
→ Phase ambiguity cancellation (位相不確定性の除去)

多くの研究者が無線LANのCSIの扱いに苦労しているが  
チップメーカーは非協力的(やる気がない)

# 検討している方法

## ■ Wi-Fi CSI振幅情報のみを用いたヒトのデバイスフリー測距 [特徴]

- CSIの位相情報は不要
- 単素子アンテナのデバイスを利用可能
- ヒトの呼吸等によるマイクロドップラーを利用
- 送受信局間のToF※ (Time-of-Flight) を推定  
※ ToFは光速を用いて距離に換算可能

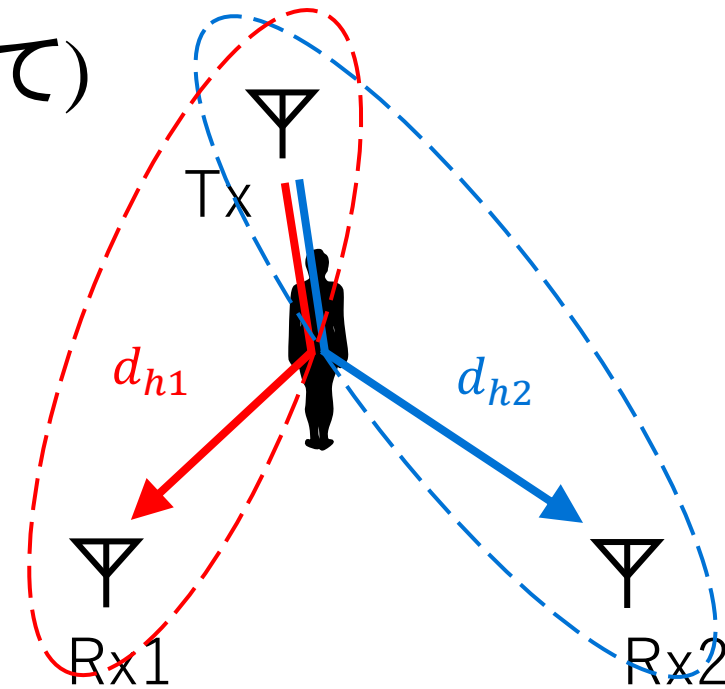


マイクロドップラーを含んだ成分のみを抽出し、  
人体を経由するパスの距離を推定

# 検討している方法

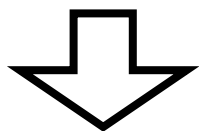
- Wi-Fi CSI振幅情報のみを用いたヒトのデバイスフリー測距  
[測距データから測位を行う方法]
  - 複数局 (3局以上) 間の距離情報 (ToF) を利用
  - 2局を焦点とした楕円を描く (全組合せに対して)
  - 楕円の交点をヒト存在位置とする

測距情報から測位が可能  
局数が増えれば精度が向上

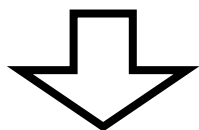


# 測距法の原理

① CSI振幅情報観測



② ドップラー成分抽出

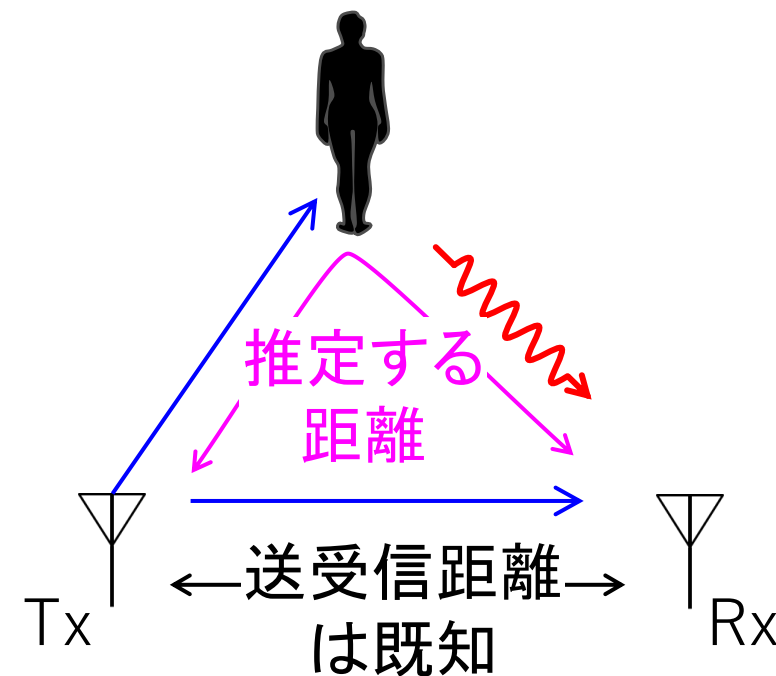


③ 距離推定

① チャンネルの観測

観測時刻 $t$ における  
全サブキャリアのCSI

$$\mathbf{h}(t) = \begin{pmatrix} h_1(t) \\ \vdots \\ h_k(t) \\ \vdots \\ h_K(t) \end{pmatrix} \cdot \underline{e^{j\theta(t)}} \quad \text{位相回転}$$



$t$  : 観測時刻

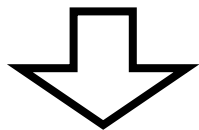
$k$  : サブキャリア番号

$K$  : サブキャリア数

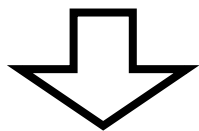
$\theta(t)$  : クロック非同期による位相回転

# 測距法の原理

① CSI振幅情報観測



② ドップラー成分抽出



③ 距離推定

人体により生ずるドップラーシフトについて  
サブキャリア# $k$ の真のチャネル

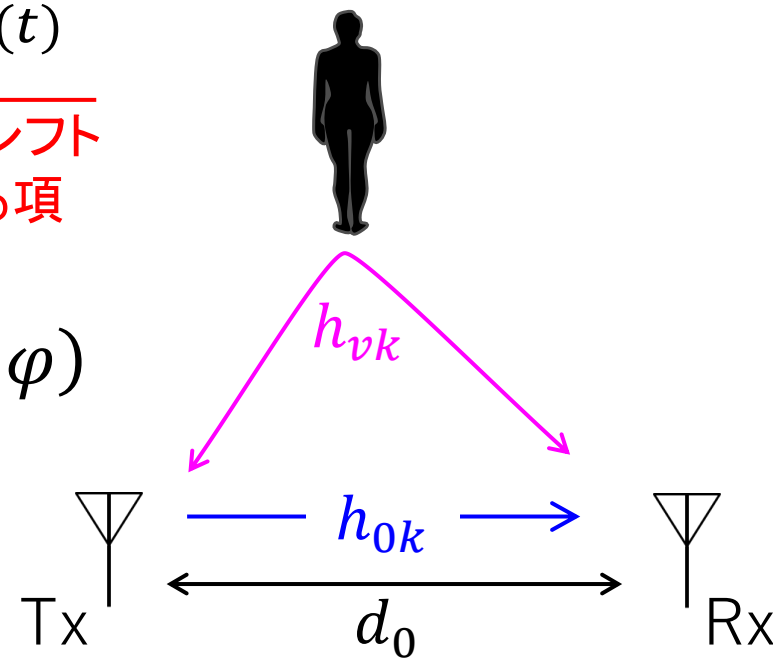
$$h_k(t) = h_{0k} + h_{vk} e^{j\psi(t)}$$

ドップラーシフト  
が含まれる項

ここで,

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda_k} \Delta d \cos(\omega t + \varphi)$$

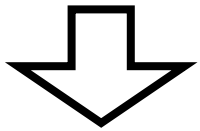
- $h_{0k}$  : 直接波のチャネル
- $h_{vk}$  : ヒト経由のチャネル
- $\lambda_k$  : 波長
- $\Delta d$  : 体動による距離変化の振幅



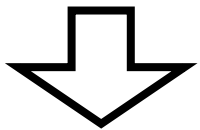
# 測距法の原理

⊙ : アダマール積

① CSI振幅情報観測



② ドップラー成分抽出



③ 距離推定

振幅（の2乗）を使用：送受信間の位相同期が不要

$$\mathbf{h}'(t) = \mathbf{h} \odot \mathbf{h}^*$$

$$= \begin{pmatrix} h_1(t) \\ \vdots \\ h_k(t) \\ \vdots \\ h_K(t) \end{pmatrix} \cdot \cancel{e^{j\theta(t)}} \odot \begin{pmatrix} h_1^*(t) \\ \vdots \\ h_k^*(t) \\ \vdots \\ h_K^*(t) \end{pmatrix} \cdot \cancel{e^{-j\theta(t)}} \quad \text{位相回転除去}$$

$$= \begin{pmatrix} |h_1(t)|^2 \\ \vdots \\ |h_k(t)|^2 \\ \vdots \\ |h_K(t)|^2 \end{pmatrix}$$

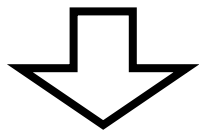
$\mathbf{h}$  : 観測されるチャネル

$\mathbf{h}'$  : チャネル振幅の2乗

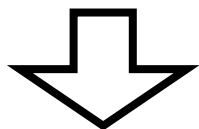
⊙ : アダマール積

# 測距法の原理

① CSI振幅情報観測



② ドップラー成分抽出



③ 距離推定

② ドップラー成分抽出

$$|h_k(t)|^2 = h_k(t) h_k^*(t)$$

$$= \{h_{0k} + h_{vk} e^{j\psi(t)}\} \{h_{0k}^* + h_{vk}^* e^{-j\psi(t)}\}^*$$

$$= |h_{0k}|^2 + \boxed{h_{0k} h_{vk}^* e^{-j\psi(t)} + h_{0k}^* h_{vk} e^{j\psi(t)}} + |h_{vk}|^2$$

固定成分

固定成分

$$h_{0k} h_{vk}^* e^{-j\psi(t)} + h_{0k}^* h_{vk} e^{j\psi(t)}$$

固定 + 変動成分 →

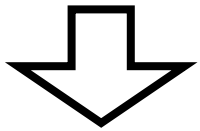
$$= h_{0k} h_{vk}^* e^{-j\frac{2\pi}{\lambda_k} \{\Delta d \cos(\omega t + \varphi)\}} + h_{0k}^* h_{vk} e^{j\frac{2\pi}{\lambda_k} \{\Delta d \cos(\omega t + \varphi)\}}$$

固定成分は使用しない，変動成分を利用する

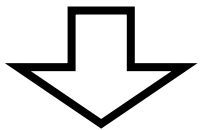


# 測距法の原理

① CSI振幅情報観測



② ドップラー成分抽出



③ 距離推定

ここで、 $h_{0k}^* h_{vk}$  =  $p + jq$  と置くと※1

$$h_{0k} h_{vk}^* e^{-j\frac{2\pi}{\lambda_k}\{\Delta d \cos(\omega t + \varphi)\}} + h_{0k}^* h_{vk} e^{j\frac{2\pi}{\lambda_k}\{\Delta d \cos(\omega t + \varphi)\}}$$

$$= (p - jq) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda_k}\{\Delta d \cos(\omega t + \varphi)\}} + (p + jq) e^{j\frac{2\pi}{\lambda_k}\{\Delta d \cos(\omega t + \varphi)\}}$$

Jacobi-Anger展開（0次，±1次のみ※2）を行うと，

※1  $h_{0k}^* h_{vk}$  は2つの伝搬路情報が乗算されたもので，  
（Tx-Rx見通し伝搬路[既知]）×（人体経由の伝搬路[未知]）  
が乗算されたもの

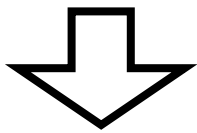
※2 静止時は

体表面変位幅 $\Delta d <$  波長(12cm程度@2.4 GHz)

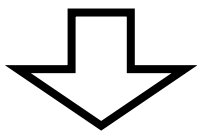
と仮定するため，2次以降は無視できるほど小さい

# 測距法の原理

① CSI振幅情報観測



② ドップラー成分抽出



③ 距離推定

※1  $J_n$ : 第1種Bessel関数

※2 伝搬路情報:  $h_{0k}h_{vk}^* = p + jq$

Jacobi-Anger展開 (0次,  $\pm 1$ 次) のみ行くと,

$$\approx (p - jq) \left\{ \sum_{n=-1}^1 i^n \cdot J_n\left(-\frac{2\pi}{\lambda_k} \Delta d \cos \varphi_0\right) e^{in\omega t} \right\} \cdot \left\{ \sum_{n=-1}^1 J_n\left(\frac{2\pi}{\lambda_k} \Delta d \sin \varphi_0\right) e^{in\omega t} \right\}$$

$$+ (p + jq) \left\{ \sum_{n=-1}^1 i^n \cdot J_n\left(\frac{2\pi}{\lambda_k} \Delta d \cos \varphi_0\right) e^{in\omega t} \right\} \cdot \left\{ \sum_{n=-1}^1 J_n\left(-\frac{2\pi}{\lambda_k} \Delta d \sin \varphi_0\right) e^{in\omega t} \right\}$$

$$= 2p + 4p \cdot J_1\left(\frac{2\pi}{\lambda_k} \Delta d \cos \varphi_0\right) J_1\left(\frac{2\pi}{\lambda_k} \Delta d \sin \varphi_0\right) \sin 2\omega t$$

バイタルサイン  
の2倍波

残存する固定成分  $\rightarrow$

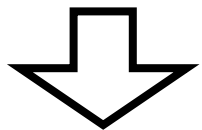
$$-4q \cdot J_1\left(\frac{2\pi}{\lambda_k} \Delta d \cos \varphi_0\right) \cos \omega t - 4q \cdot J_1\left(\frac{2\pi}{\lambda_k} \Delta d \sin \varphi_0\right) \sin \omega t$$

バイタルサイン  
の基本波

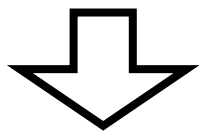
CSI乗値からバイタルサイン基本波成分を抽出  $\rightarrow$  伝搬路情報※2の虚部を推定可

# 測距法の原理

① CSI振幅情報観測



② ドップラー成分抽出



③ 距離推定

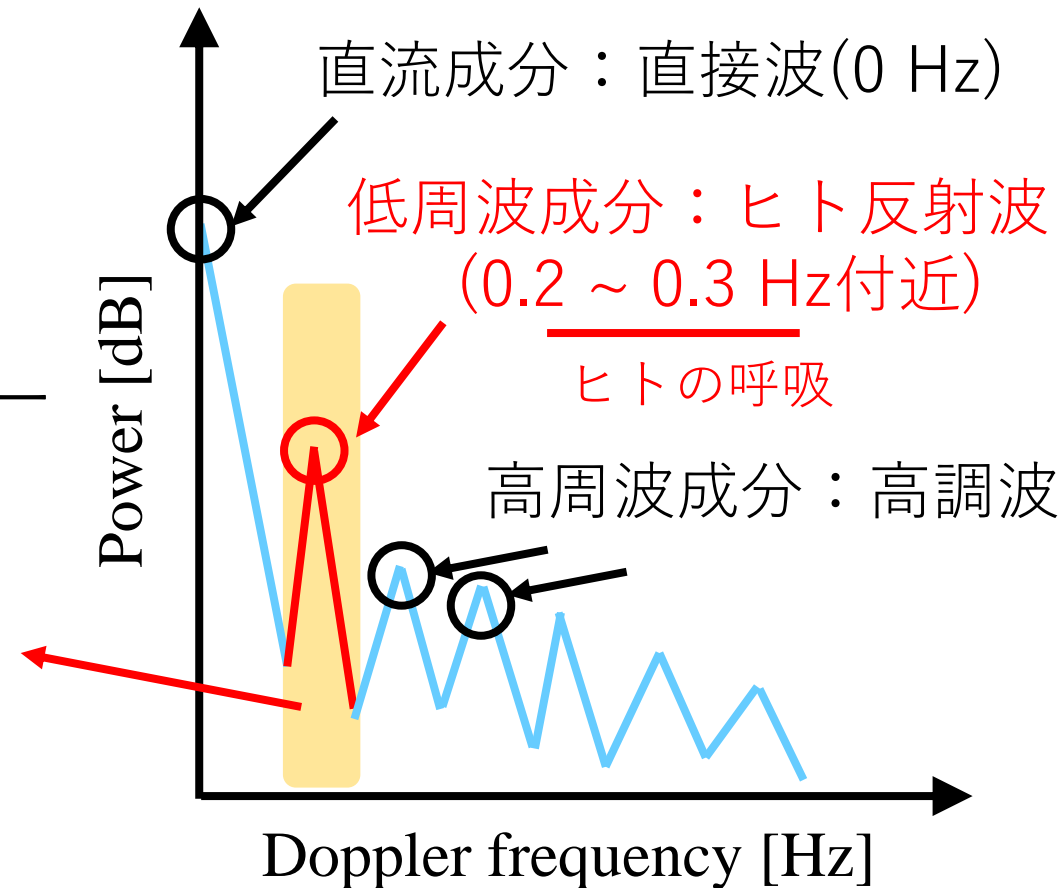
伝搬路情報の虚部の抽出の実際

(1)  $h'(t)$ をフーリエ変換

$$H(\omega) = \mathcal{F}[h'(t)]$$

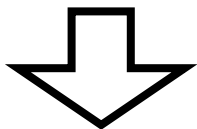
(2) ヒト由来のドップラー成分を抽出

→FFT値から $q$ を算出  
(基本モード相当)

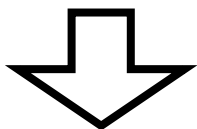


# 測距法の原理

① CSI振幅情報観測



② ドップラー成分抽出



③ 距離推定

③ 距離推定

(1) 全サブキャリア ( $K$ ) に対し  
同様に係数 ( $q$ ) を計算

(2) 係数  $q$  は周波数方向に正弦波

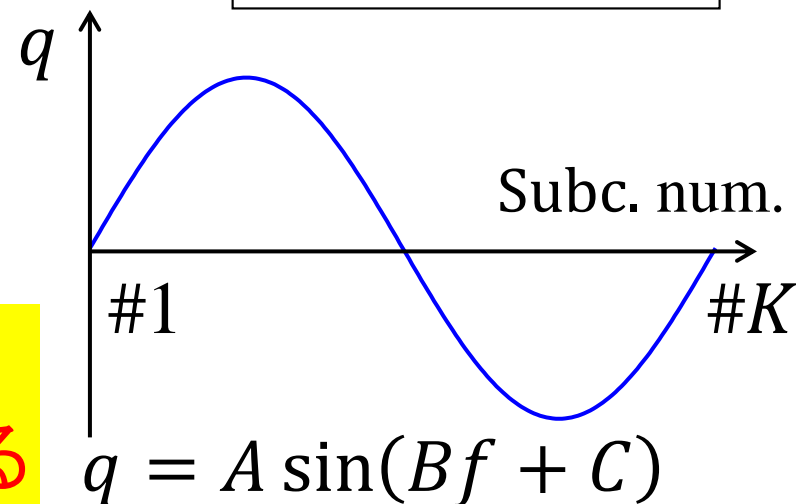
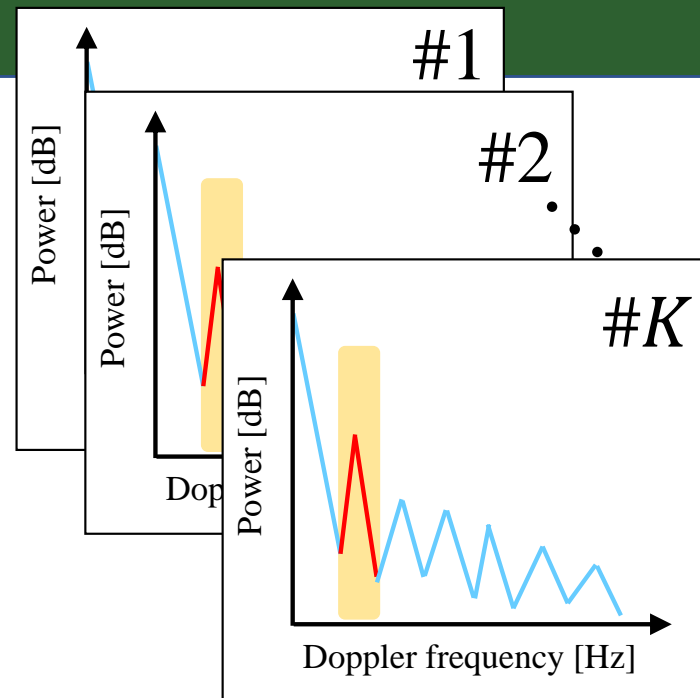
$$q = A \sin(Bk + C)$$

となる ( $k$ : サブキャリア番号).

→  $B$  を推定

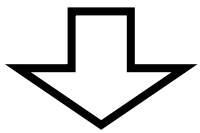
$$h_{0k}^* h_{vk} = p + jq = Ae^{j(Bk+C)}$$

→  $B$  はCSIのサブキャリアの相対位相傾きを表している

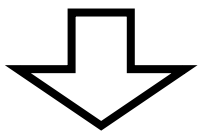


# 測距法の原理

① CSI振幅情報観測



② ドップラー成分抽出



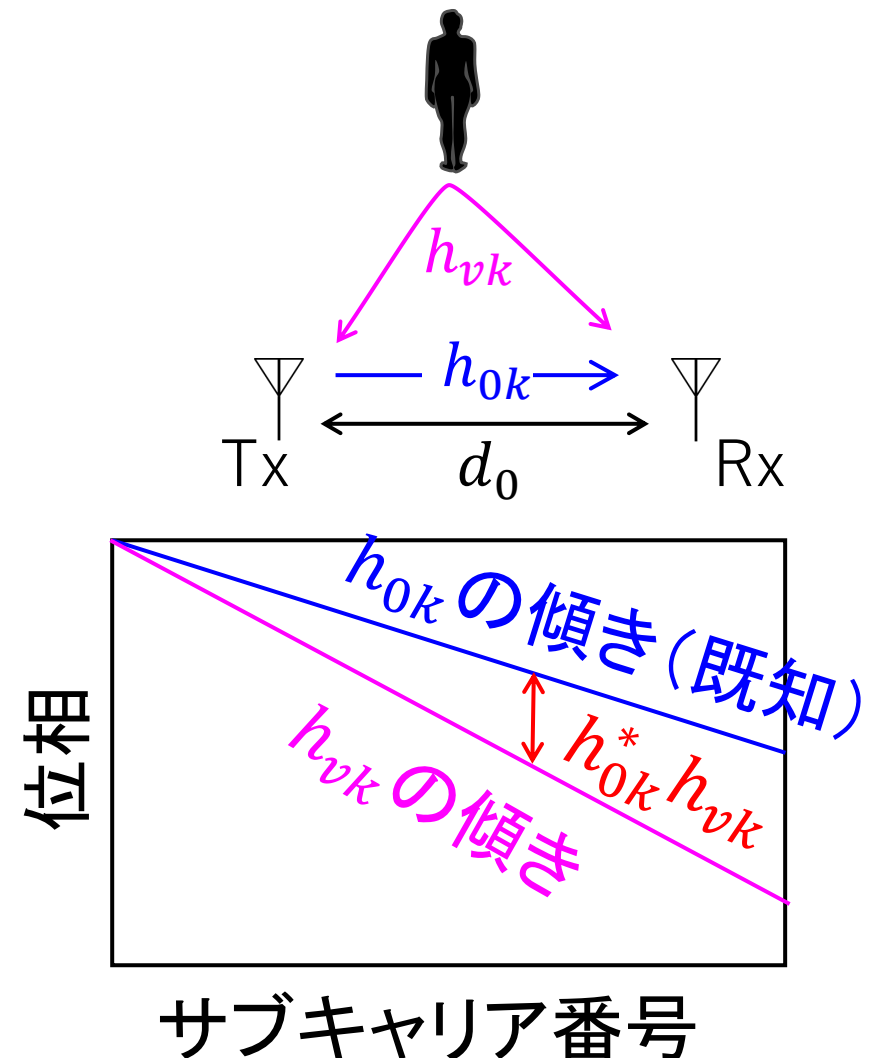
③ 距離推定

(3) 伝搬距離の算出

$$d_h = \frac{B(K-1)}{k_K - k_1} + d_0$$

により人体経由の伝搬路  
を推定可能

- $d_0$  : Tx-Rxの見通し距離
- $d_h$  : 人体経由の伝搬距離
- $K$  : サブキャリア数
- $B$  : 提案法で推定した係数

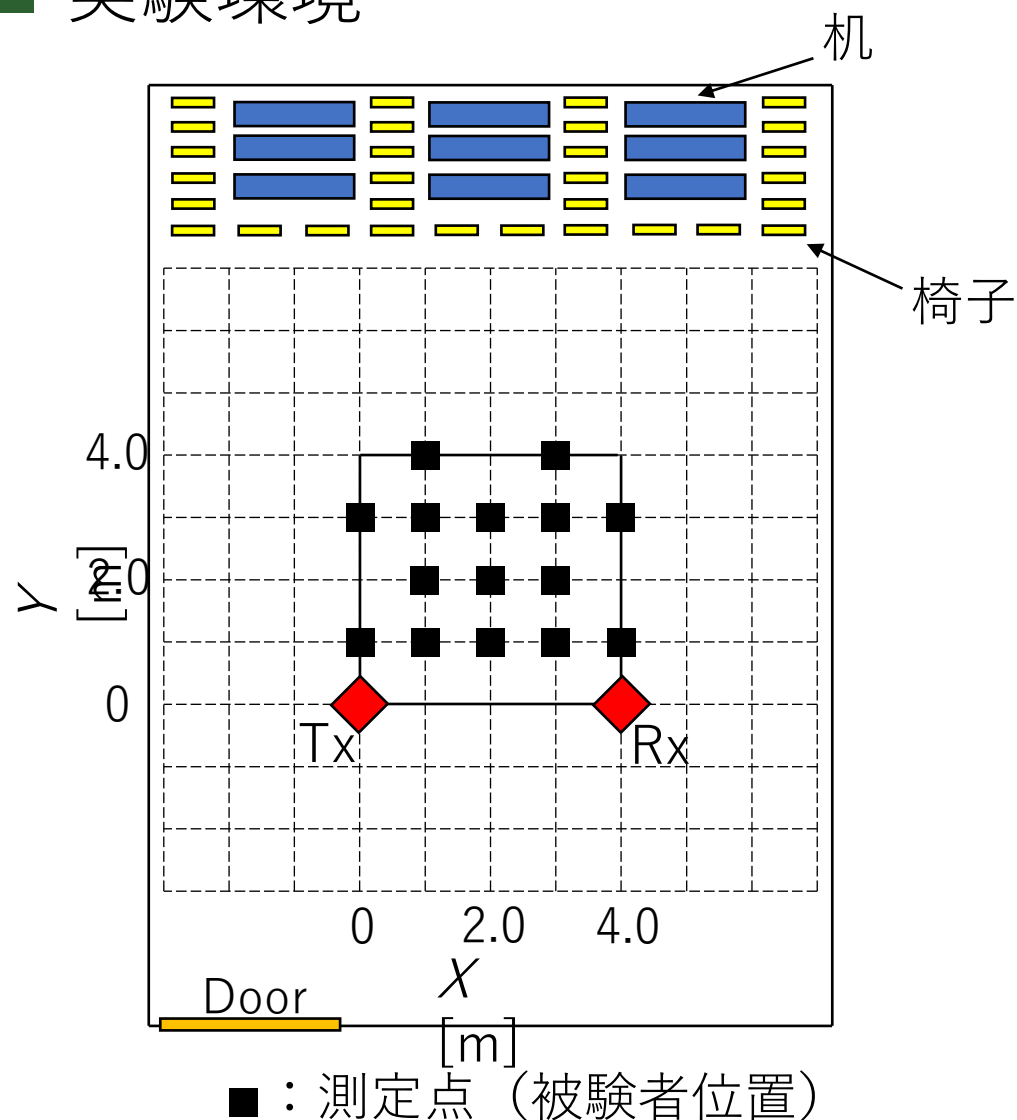


# 目次

- ISACが求められる背景
- Wi-Fiを用いたヒトセンシング
- 実験結果
- まとめ

# 実験条件

## ■ 実験環境

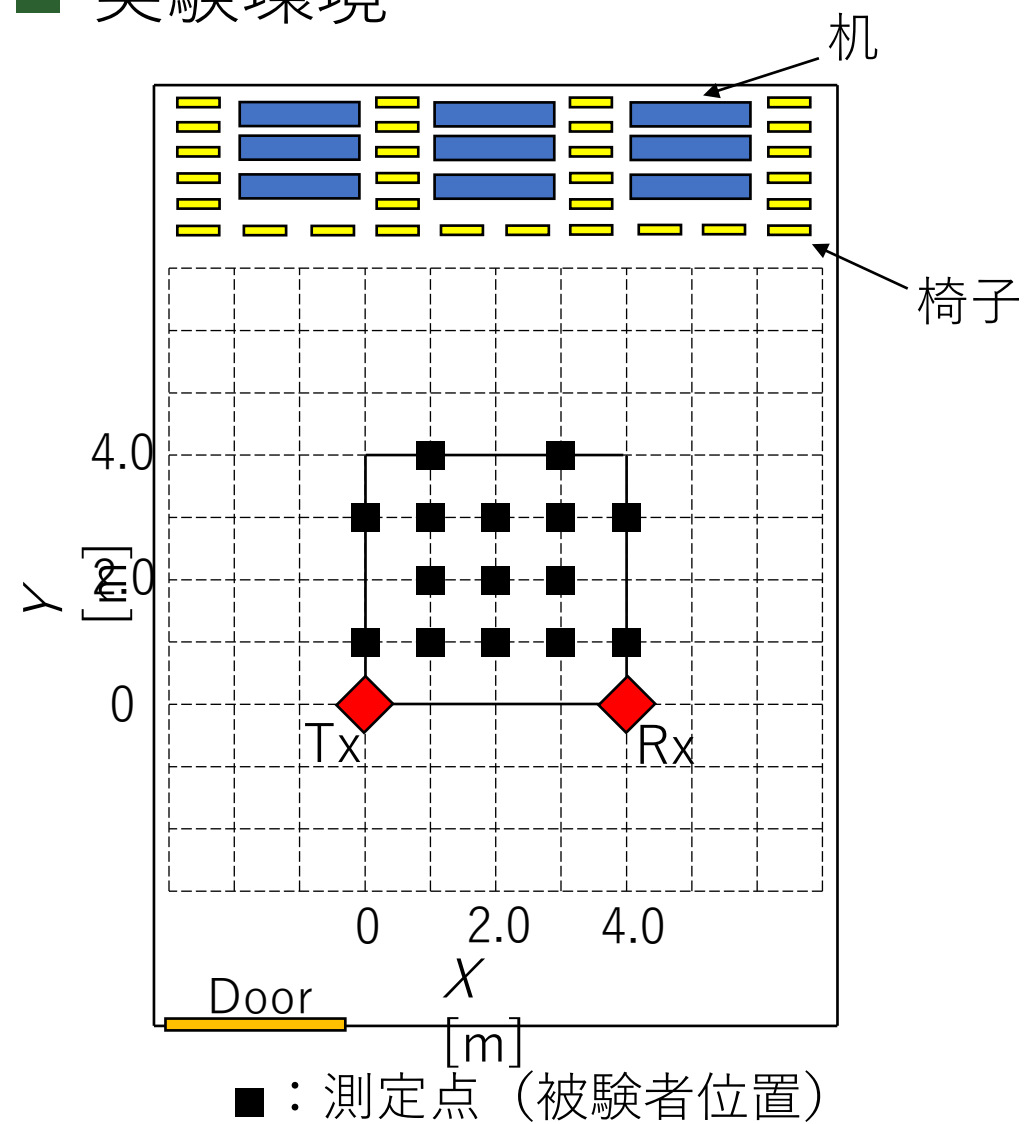


## ■ 実験・解析条件

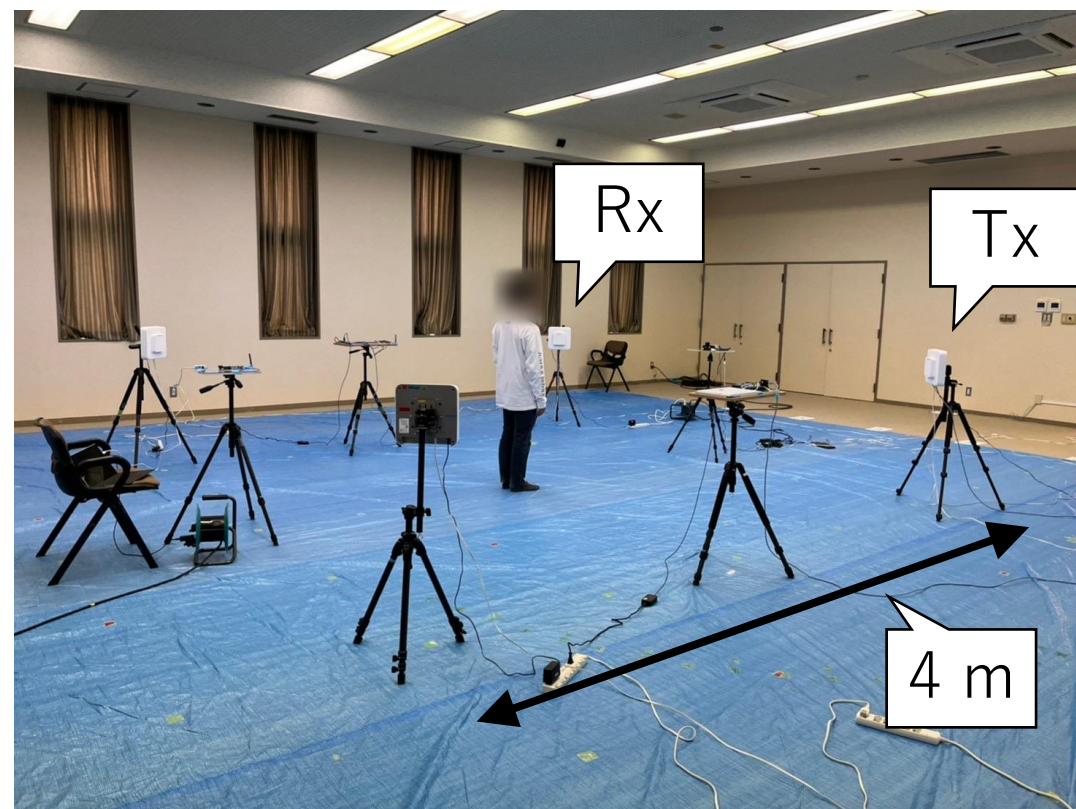
使用アンテナ数	1 × 1 SISO
Wi-Fi規格	IEEE 802.11ax
中心周波数	2.412GHz
周波数帯域	20 MHz
サブキャリア数	53
サンプリング周波数	10 Hz
測定地点数	15
測定時間	12.8 s
被験者数	4
Tx-Rx間距離	4 m
抽出する周波数	0.10 ~ 1.0 [Hz]

# 実験条件

## ■ 実験環境



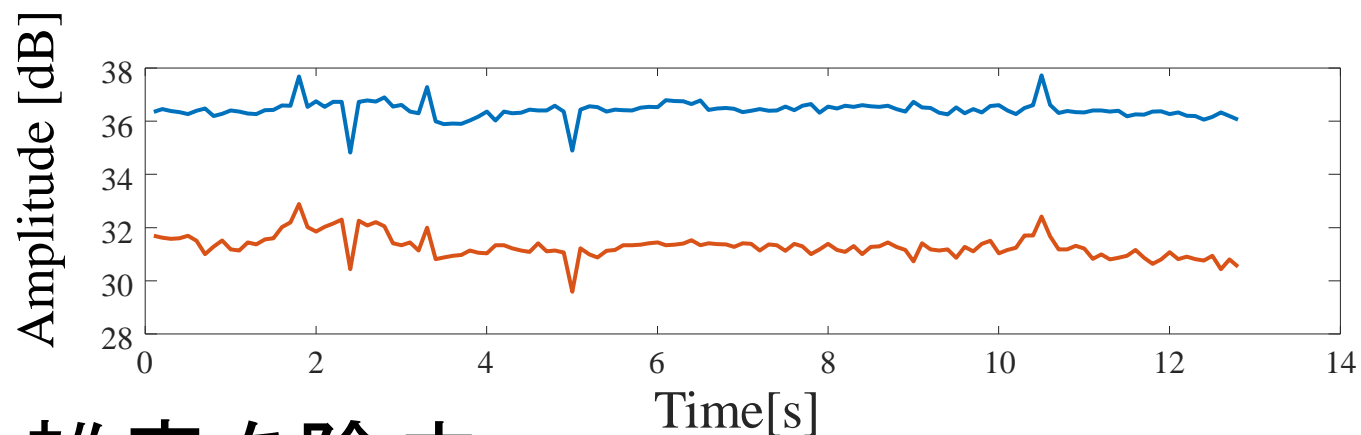
岩手大学倫理審査#202019



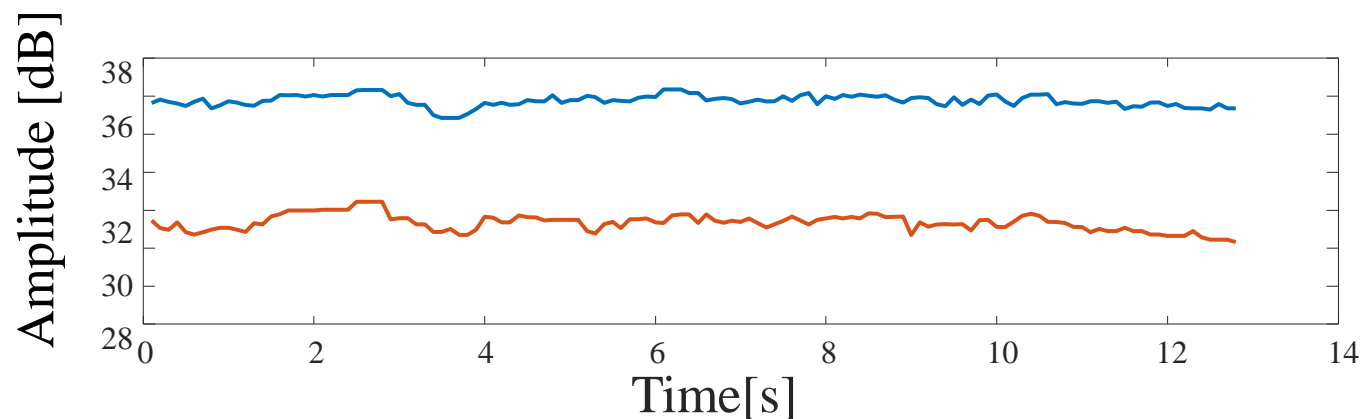


# 実験結果

## ■ CSI振幅の時間変化

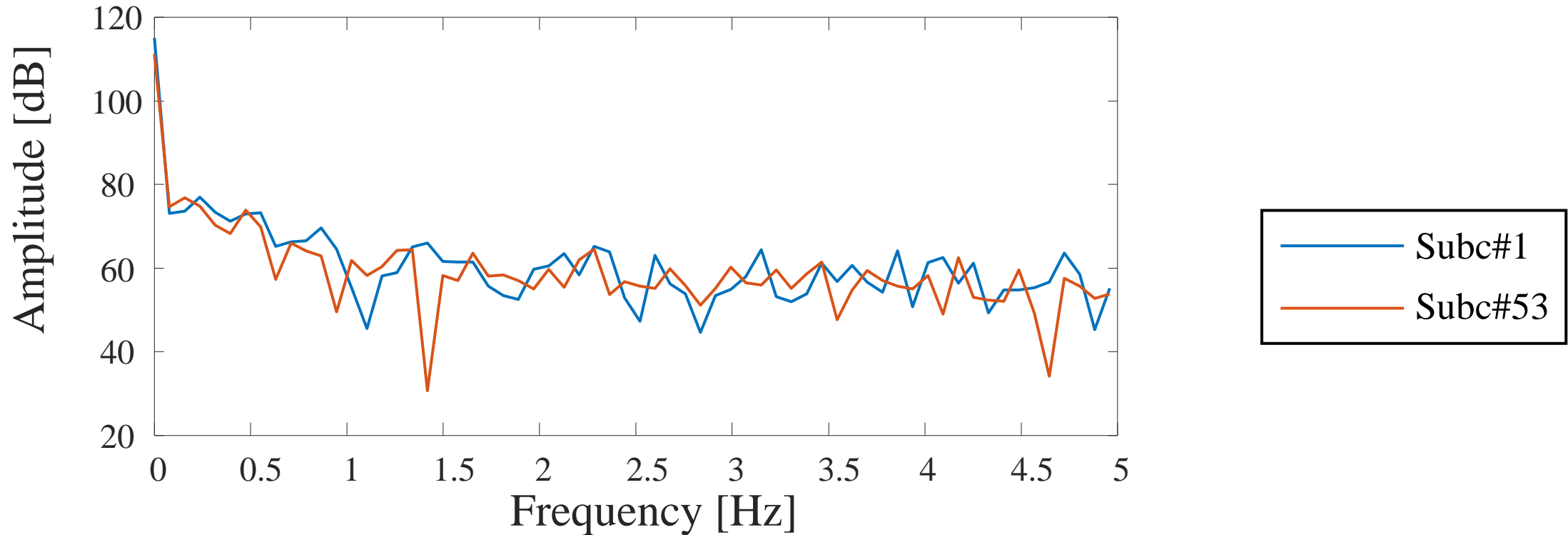


## ■ AGCによる雑音を除去



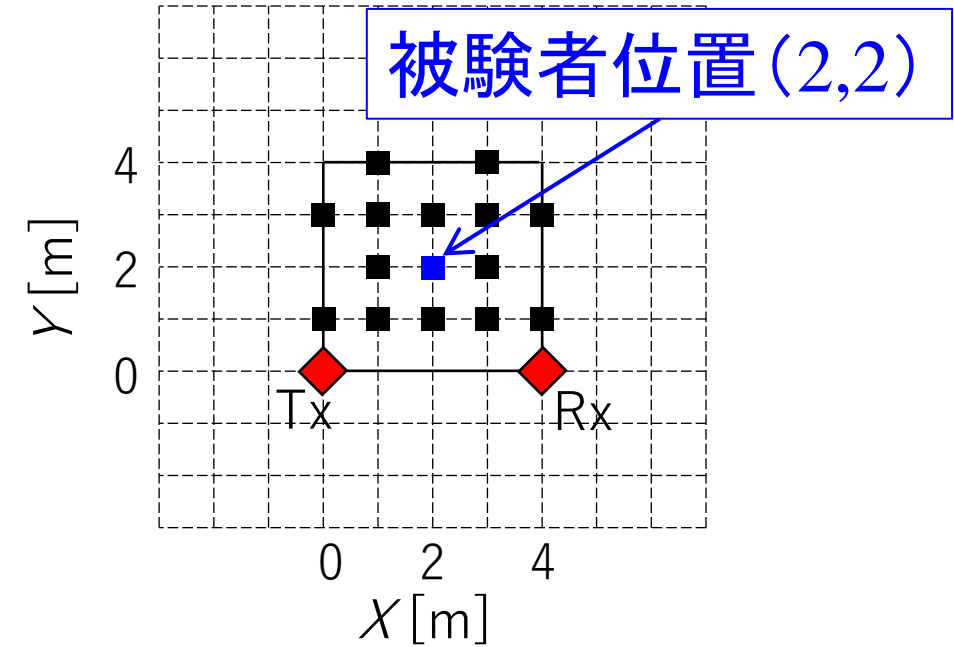
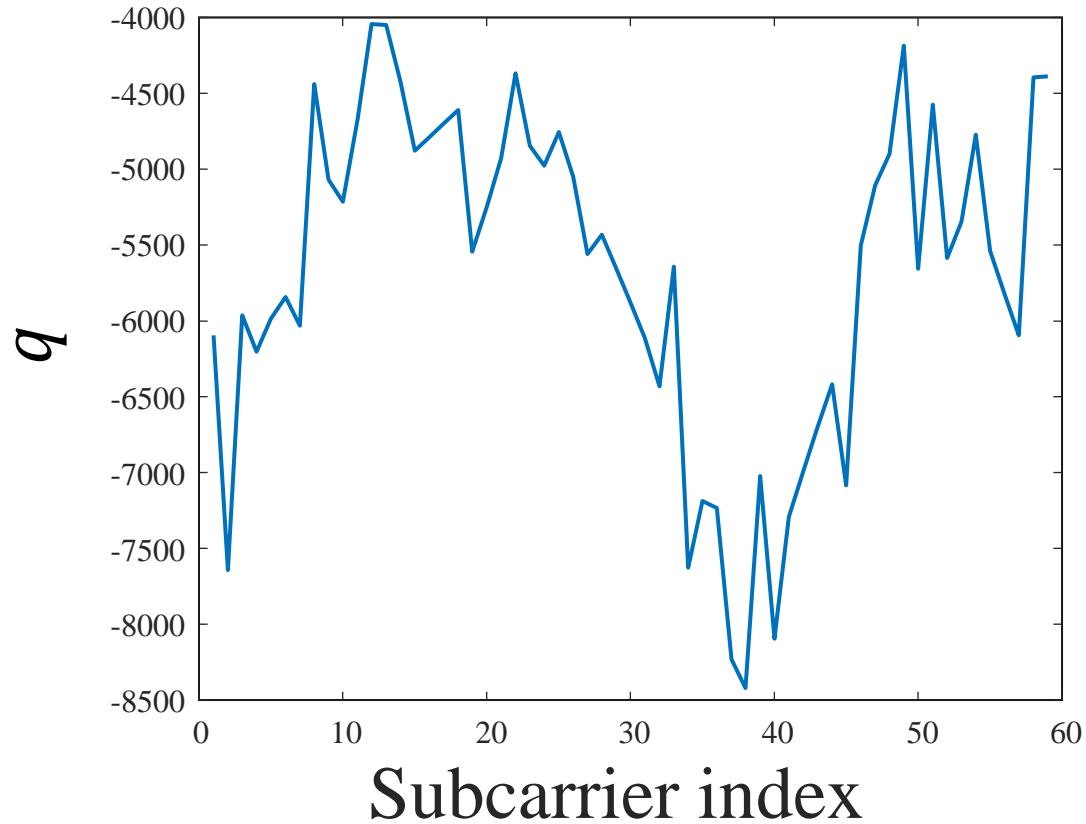
# 実験結果

## ■ FFTにより得られた周波数特性



# 実験結果

## ■ パラメータの推定



パラメータのモデル

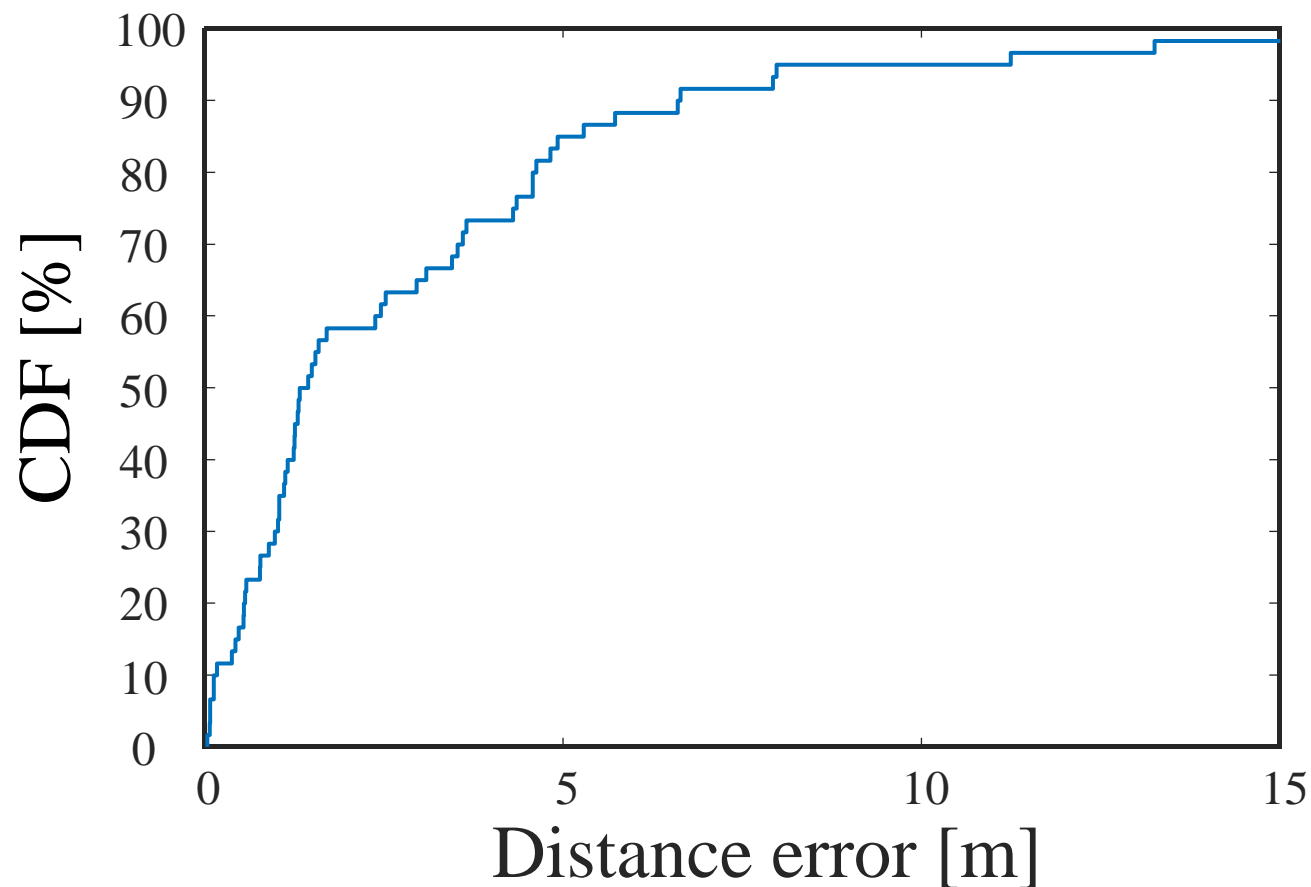
$$q = A \sin(Bk + C)$$

表. 推定された値

$B$	0.0179
推定距離	6.6 m
真の距離	5.6 m
推定誤差	1.0 m

# 実験結果

## ■ 推定誤差の累積確率分布 (CDF: Cumulative Distribution Function)



### 実験条件

被験者数	4
測定点数	15

### 実験結果

50%値	1.38 m
75%値	4.33 m

距離推定誤差の中央値は 1.38m

# 目次

- ISACが求められる背景
- Wi-Fiを用いたヒトセンシング
- 実験結果
- まとめ

# まとめ

## Wi-Fi CSIを用いたヒトセンシング

### ■ISACの背景と課題

周波数とハードウェアリソースの共用 { 周波数帯域の不足  
標準化・制度の進展  
通信とセンシングのハードウェアの違い

### ■Wi-Fiを用いたデバイスフリーヒトセンシング

CSIを利用したヒト測距(CSI振幅情報とヒトドップラーを利用)  
→実機により測位誤差1.38 m @50% を実現

ISACの一つであるWi-Fiヒトセンシングについて紹介  
→今後は測位や識別など