

# 屋内環境でのwi-fiの電波状況を推測する 無線通信空間の確率的デジタルツイン構築

大阪大学 情報科学研究科

児玉大暉 本多弘睦 T.ナタオン 義久智樹 下西英之



# 背景

---

将来的なサイバーフィジカルシステム(CPS)の実現

➤人間とロボットが共存する世界

- **ロボット遠隔制御**

- **自動運転技術**

➤高性能でロバストな**通信可視化技術が必要**

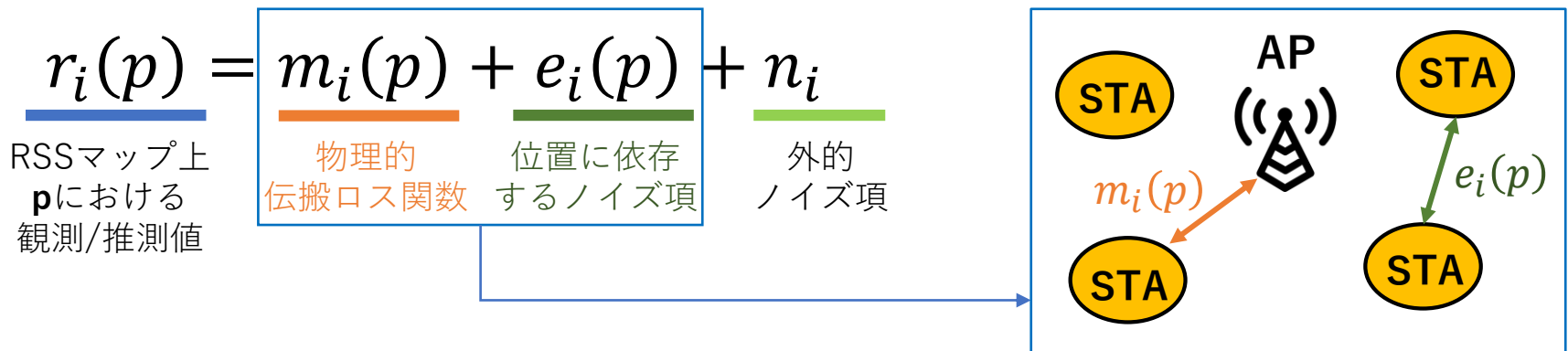
- 機械が電波不安定な場所に移動すると

  - 制御できなくなる・予期せぬ動作を起こす可能性

**無線通信空間のデジタルツインをリアルタイムに構築**

# 既存のRSSマップ作成手法

## ガウス過程を用いたRSSマップ推定<sup>[1]</sup>



## グラフラプリアン行列を用いたRSSマップ推定<sup>[2]</sup>

- エリアをグラフ構造と見て推測
- 各地点の電力値を配列で扱い、行列計算によって推測
- 観測点から数ホップ内のノードを逐次的に推測

# CPS対応通信可視化技術の問題

## ➤ センサ設置

- 置く場所・コスト

## ➤ APの情報は利用者にとって必ずしも既知ではない

- APの位置や送信電波強度の情報が必要

## ➤ 推測したRSSの信頼性が不明瞭

- 推測したRSSが存在しない場合、不具合を起こす

## ➤ 空間的特性による電波状況

- 障壁による通信波の反射・減衰

## ➤ 時間の変化による電波状況

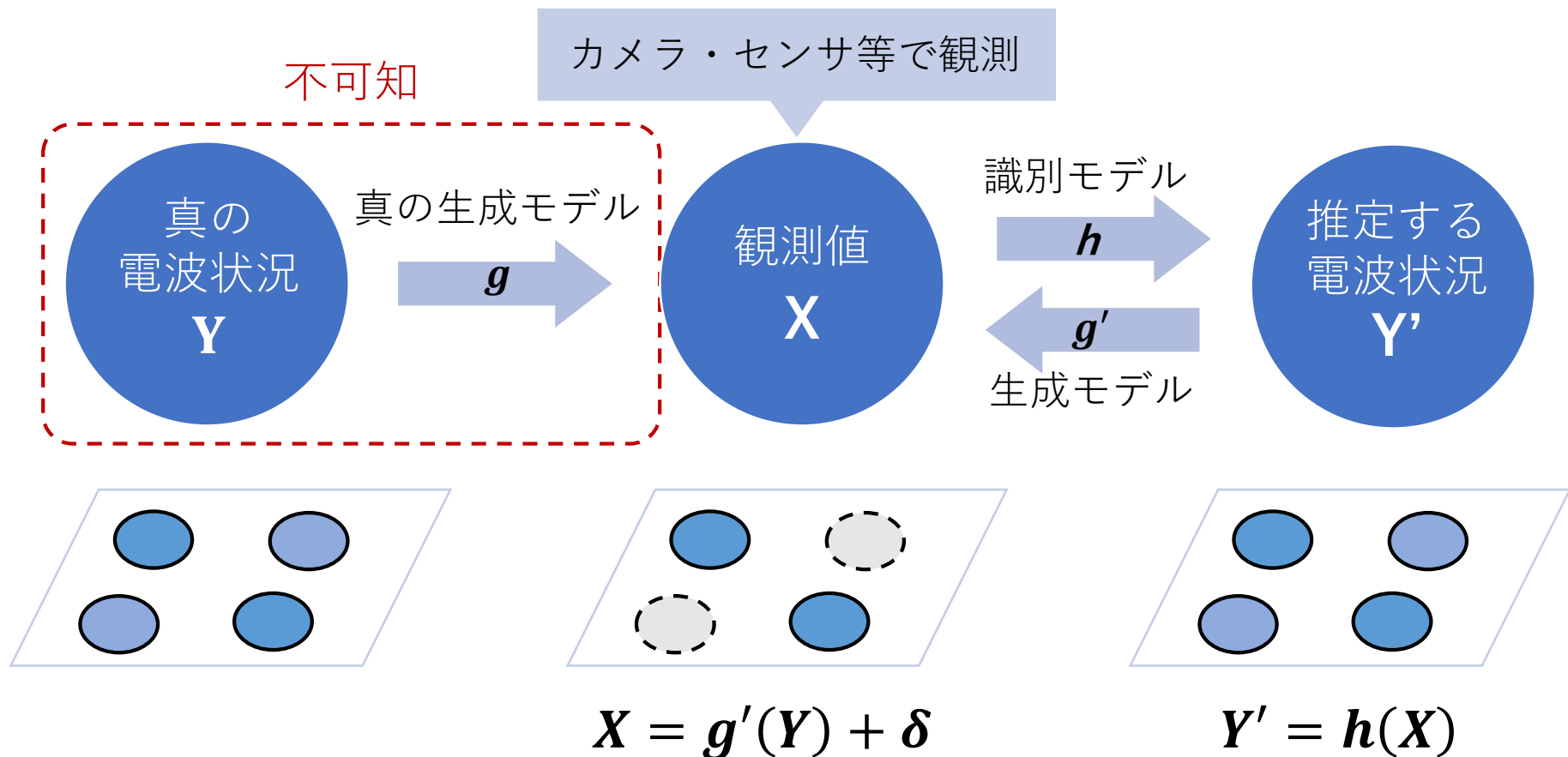
- 人通りの多さ・交通量の変化
- 観測した値の信頼度が下がる

# 研究課題

1. 観測点の数を減らしても精度を保つ
2. APの情報(位置や送信電波強度)を用いない推測手法
3. 推測したRSSの信頼性を明確化
  - 推定値だけでなく分散や確率分布などの確からしさの情報
4. 空間的特性に左右されない電波状況の可視化
  - 障壁の考慮(減衰・反射・回折)
5. 時間的状況の変化への対応
  - 時間による電波状況の変化に対応した設計
  - 時間が経った観測値の信頼度を減少させる設計

**確率的な推測・APに依存しないロバストな設計を目標として  
確率的デジタルツインを構築**

# 通信品質の確率的なデジタルツイン



- $Y$ に近くなるように  $Y'$  を推測したい
- $X$ から  $Y'$ を推測するモデル  $h$ を考える

# 目標達成のための提案手法

## 目標

- 確率的に場のRSSを推測したい
- APに依存しない推測を行いたい



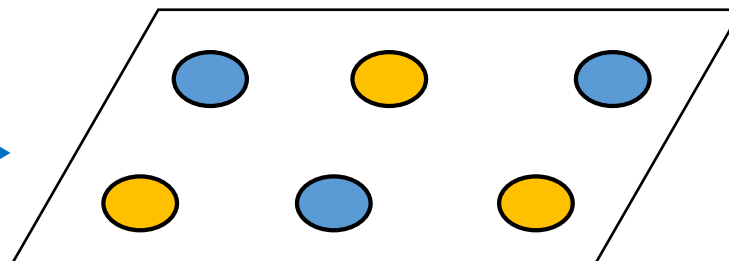
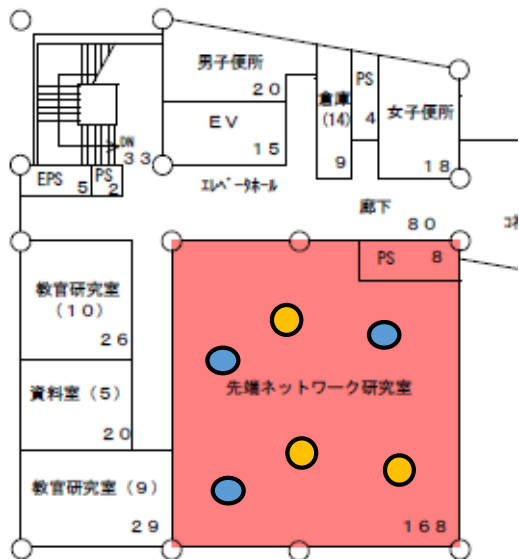
## エリアの各地点をノードと見たグラフ構造に注目

- ノード同士の関連性から推測を行うことを検討
- **グラフにマルコフ確率場**を仮定することで  
**確率分布**を用いた確率的な推測を検討

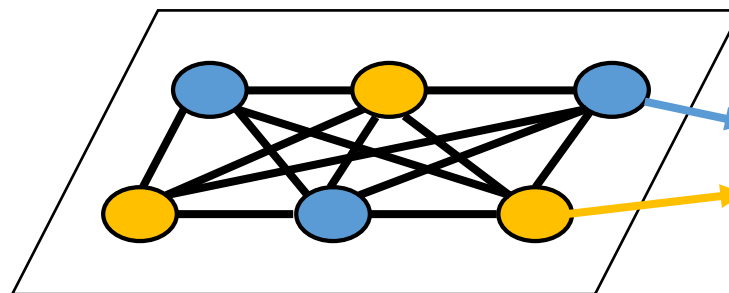
## 評価の指標

1. 確率的な推測手法の初期検討として、推測が確率的に行えているか確認 (課題2,3)
2. 課題へのアプローチとして観測数の変化について評価 (課題1)

# マルコフ確率場(MRF)の利用



各ノードは確定値ではなく**確率分布**で考える



観測地点ノード

推測地点ノード

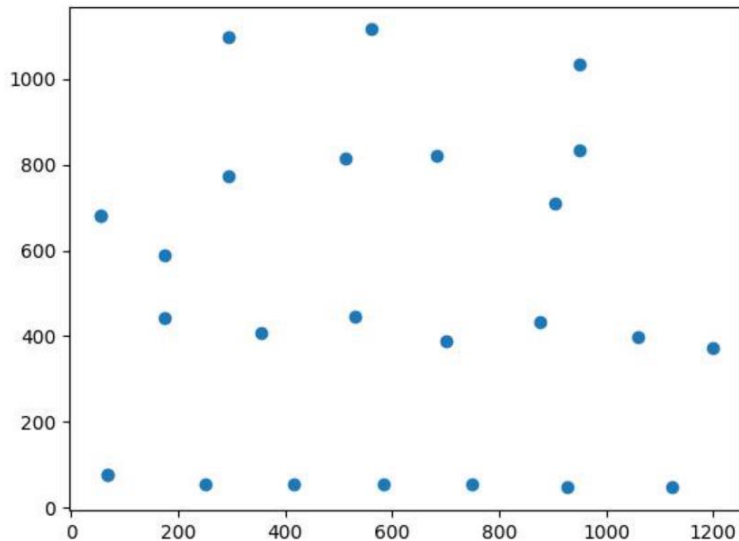
**マルコフ確率場**  
 (無向グラフィカルモデル)

- グラフが局所マルコフ性をもつと仮定
- 各ノードは自身と隣接ノードのみから影響を受ける

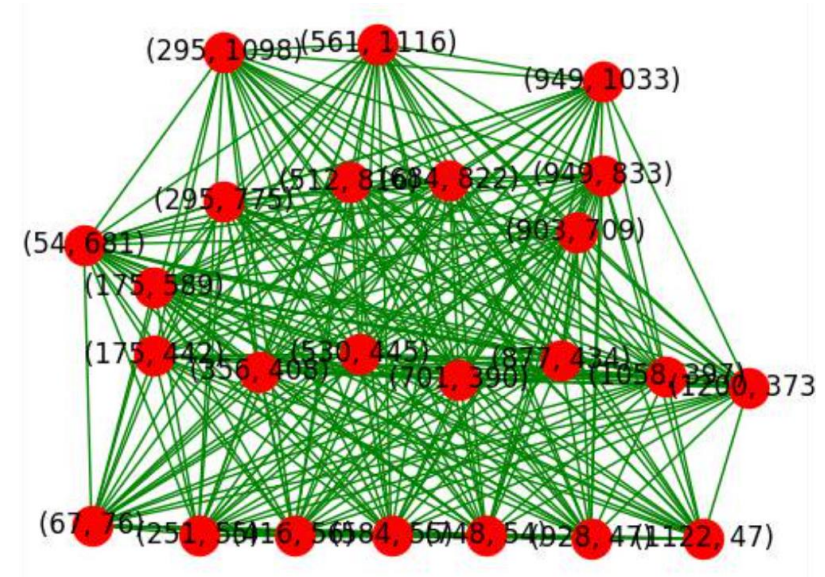


# 完全連結型グラフ

RSSを観測したノード



全ノードをエッジで連結している



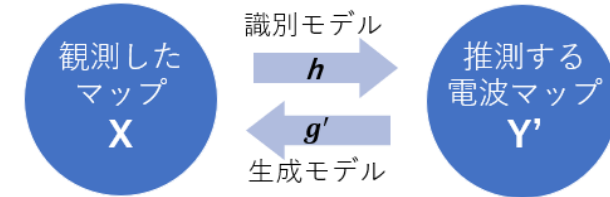
- エッジを増やすことで観測点が少ない場合にも対応
- ノードの距離が一定でなくても対応可能
- グラフ構造を格子状にする必要ない

# ベイズ・MRFを使った推定(1/3)

## 1. ベイズの定理を使ったMAP推定

➤  $Y'$  状態を求める

$$Y' = \operatorname{argmax}_{Y'} P(Y'|X)$$



➤  $Y'$ の事後確率( $P(Y'|X)$ )を直接求めるのは困難なので  
ベイズの定理より,  $P(X|Y')$ と $P(Y')$ をモデリング

$$P(Y'|X) \propto \underbrace{P(X|Y')}_{\text{orange}} \underbrace{P(Y')}_{\text{green}}$$

$X$ の事後確率 (単項)

- $Y'$ と電力値が近いほど確率が大きくなるようにする
- 観測地点は観測値を平均とする  
ガウス分布に従う
- 未観測地点は一様分布に従う

$Y'$ の事前確率 (平滑化項)

- 距離が近い隣接ノードと電力値が近いほど確率が大きくなるようにする
- MRFの仮定より各ノードはエッジでつながっているノードのみから影響を受ける

各ノードの推測値は、観測点や隣接ノードと電力値が近いほど  
確率が高くなるようにモデリング

# ベイズ・MRFを使った推定(2/3)

## 2. Xの事後確率 $P(X|Y')$ について

- $Y'$ と $X$ の間に一定のノイズ $\delta$ が乗っているとすると、  
 $i(0 \leq i \leq n)$ 番目のノードが観測点のとき

$$x_i = y_i + \delta \rightarrow \delta = x_i - y_i$$

$x_i$  :  $i$ 番ノードの観測値  
 $y_i$  :  $i$ 番ノードの推測値

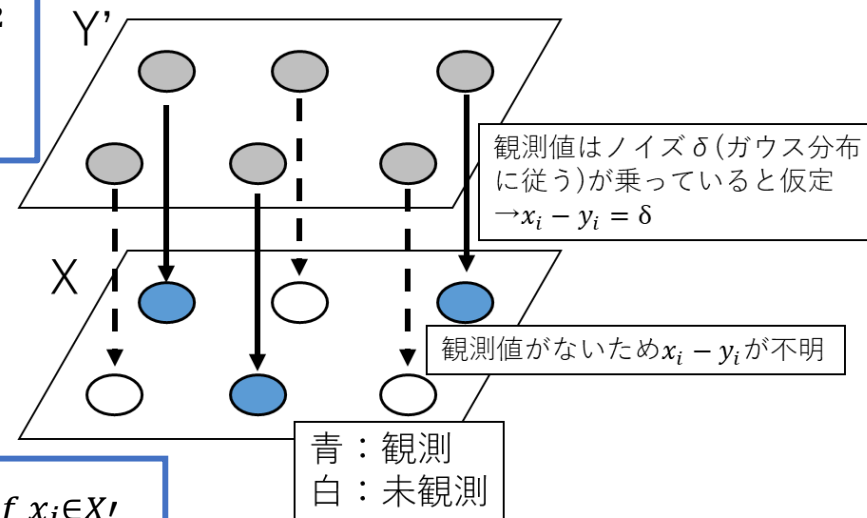
- $\delta$ が平均0で標準偏差 $\sigma$ のガウス分布に従うとすると  
 $P(x_i|y_i)$ も平均 $y_i$ で標準偏差 $\sigma$ のガウス分布に従うため

$$P(x_i|y_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x_i-y_i)^2}{2\sigma^2}} \propto e^{-\alpha(x_i-y_i)^2}$$

$\alpha$ はハイパーパラメータ

- $i$ 番目が未観測のとき、  
 $P(x_i|y_i)$ は一様分布に従う
- 最終的に $X$ の事後確率は

$$P(X|Y') = \frac{1}{Z} \prod_{1 \leq i \leq n} p_i, \quad p_i = \begin{cases} e^{-\alpha(x_i-y_i)^2} & \text{if } x_i \in X' \\ 1 & \text{if } x_i \notin X' \end{cases}$$



# ベイズ・MRFを使った推定(3/3)

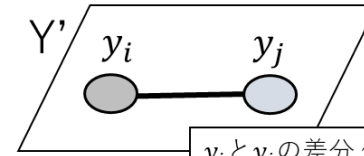
## 3. $Y'$ の事前確率 $P(Y')$ について

- 地点 $i$ と地点 $j$ の間には2点間の距離関係 $\theta_{ij}$ に応じたガウス分布があるとする

$Y'$  : 推測する電波マップ  
 $y_i$  :  $i$ 番目の推定値

$$P(Y') \propto \prod_{(i,j) \in E_Y} e^{-\beta \theta_{ij} (y_j - y_i)^2}$$

$\beta$ はハイパーパラメータ



$y_i$ と $y_j$ の差分 $y_i - y_j$ には2点間の関係 $\theta_{ij}$ に応じたガウス分布があると仮定

- $\theta_{ij}$ には2点間の距離関係のみ存在するとすると

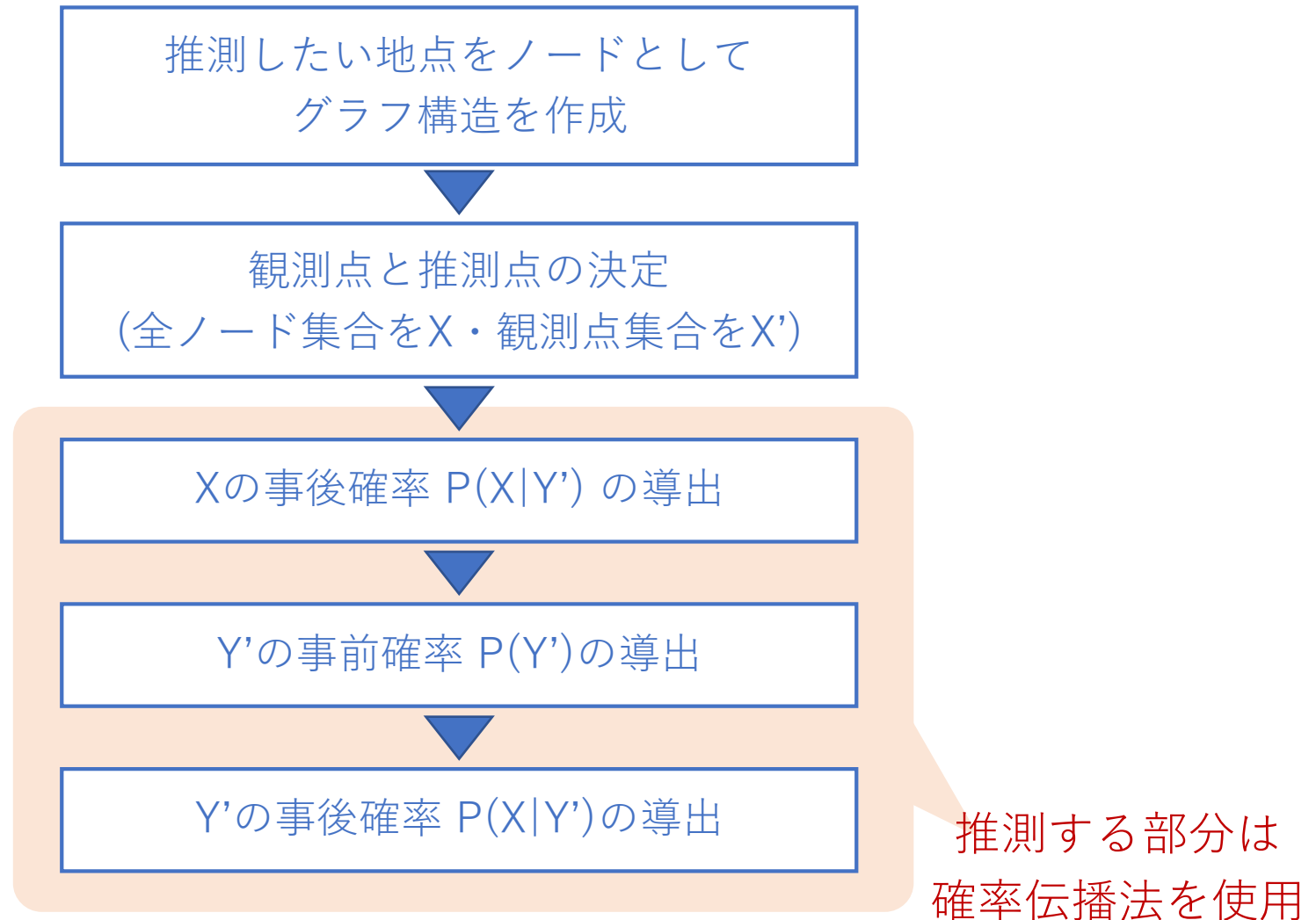
$$\theta_{ij} = e^{-\frac{r_{ij}^2}{\gamma}}$$

$\gamma$ は距離に関するハイパーパラメータ

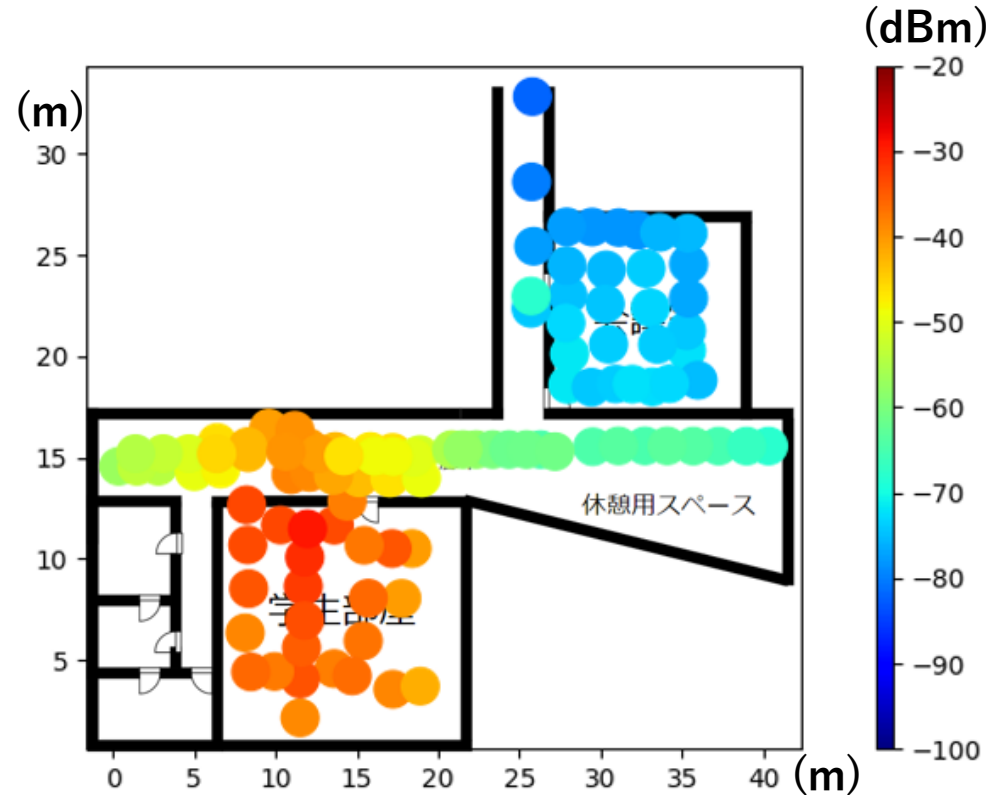
## 4. 以上より推定する $Y'$ は

$$Y' \propto \operatorname{argmax}_{Y'} \frac{1}{Z} \prod_{1 \leq i \leq n} p_i \prod_{(i,j) \in E'_Y} e^{-\beta e^{-\frac{r_{ij}^2}{\gamma}} (y_j - y_i)^2}, \quad p_i = \begin{cases} e^{-\alpha (x_i - y_i)^2} & \text{if } x_i \in X' \\ 1 & \text{if } x_i \notin X' \end{cases}$$

# 推定フロー



# 実験環境



データ収集は室内環境で行った

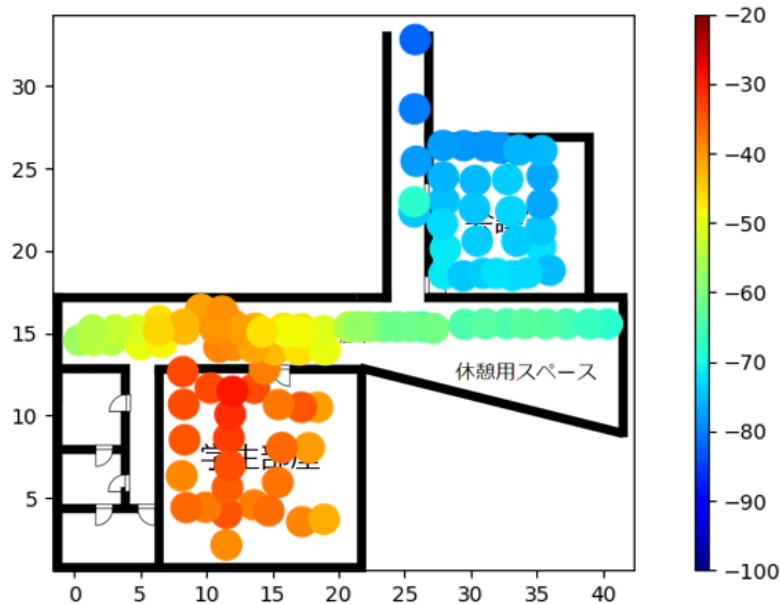
環境・観測点の異なる**2種類の計測データ**を用意

- 環境A：学生部屋のみ，24個の観測点，遮蔽・観測点が少ない
- 環境B：フロア全体，105個の観測点，遮蔽・観測点が多い

**学生部屋に設置されたAPのみから送信された電波の電力値を推測する**

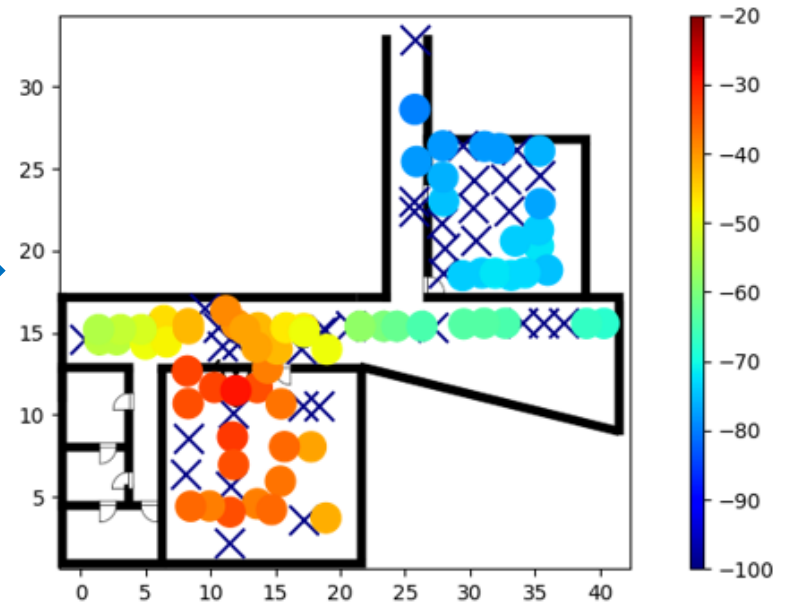
# 推測点の作成

## 全観測地点(●)



の一部

## 推測データ(×)



● : 観測データ  
× : 推測データ

## 評価項目

- 観測点の数→精度の変化
- 各推測点の確率分布

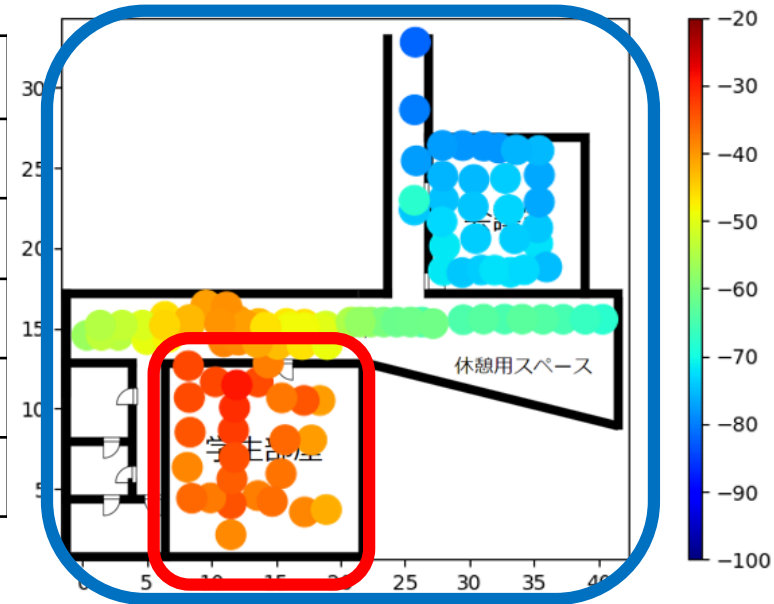
# 評価諸元

## 環境A

領域	約15×13 (m) (学生部屋)	
通信方式	Wi-Fi	IEEE802.11ax (5GHz)
ノード	数	24
	配置	観測可能地点の中で疎に配置
うち 推測点	数	1~23(1ずつ変化)
	配置	ノードからランダムに抽選

## 環境B

領域	約50×30 (m) (エリア全体)	
通信方式	Wi-Fi	IEEE802.11ax (5GHz)
ノード	数	105
	配置	観測可能地点の中で疎に配置
うち 推測点	数	5~100 (5ずつ変化)
	配置	ノードからランダムに抽選



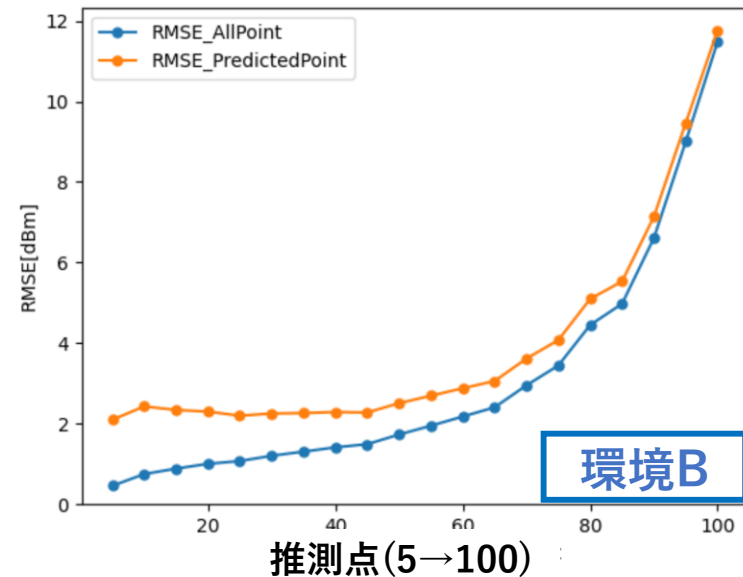
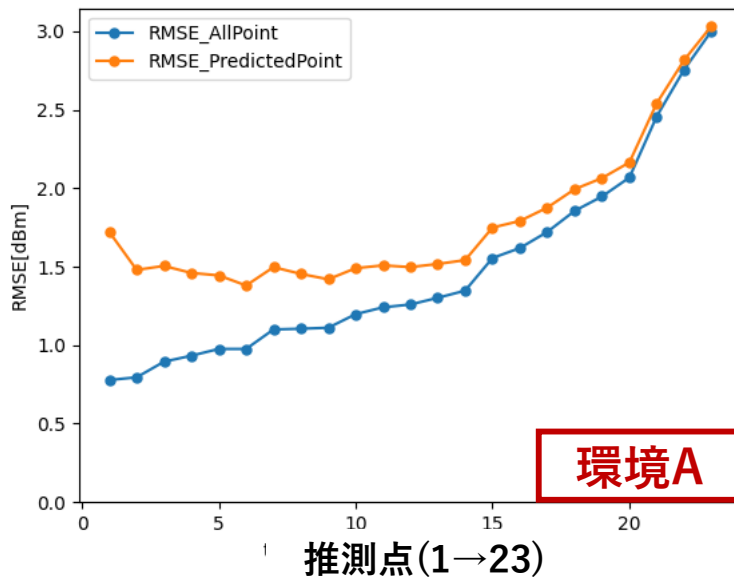
エリアの全体図

環境A:赤枠内のデータのみ使用  
環境B:青枠内の全データを使用



# 評価結果

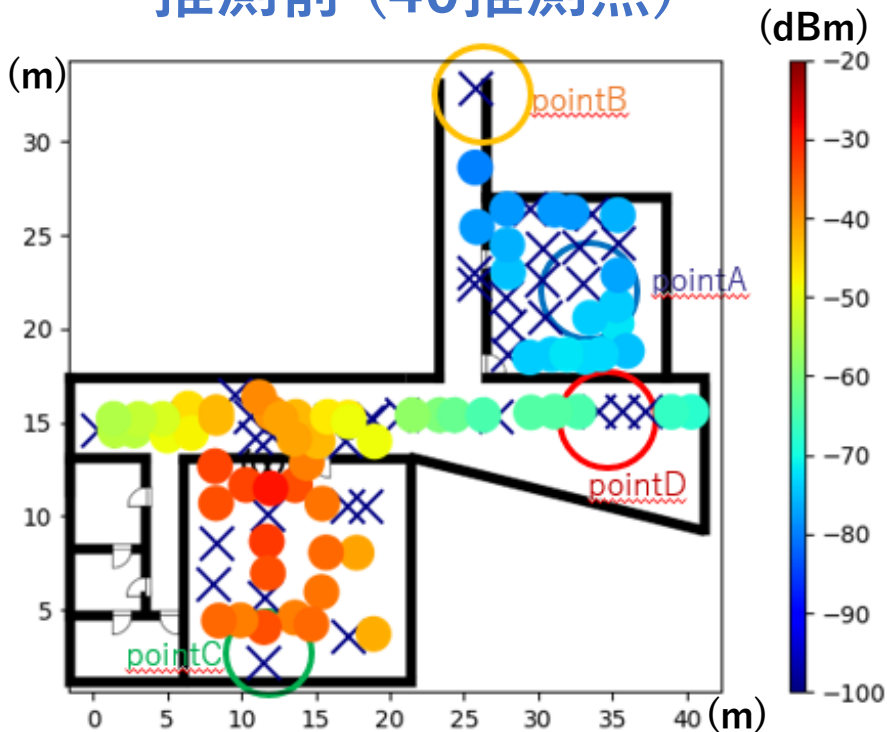
- 推測点ごとに10回推測点の位置を変化, 誤差比較のため10回の平均をとる



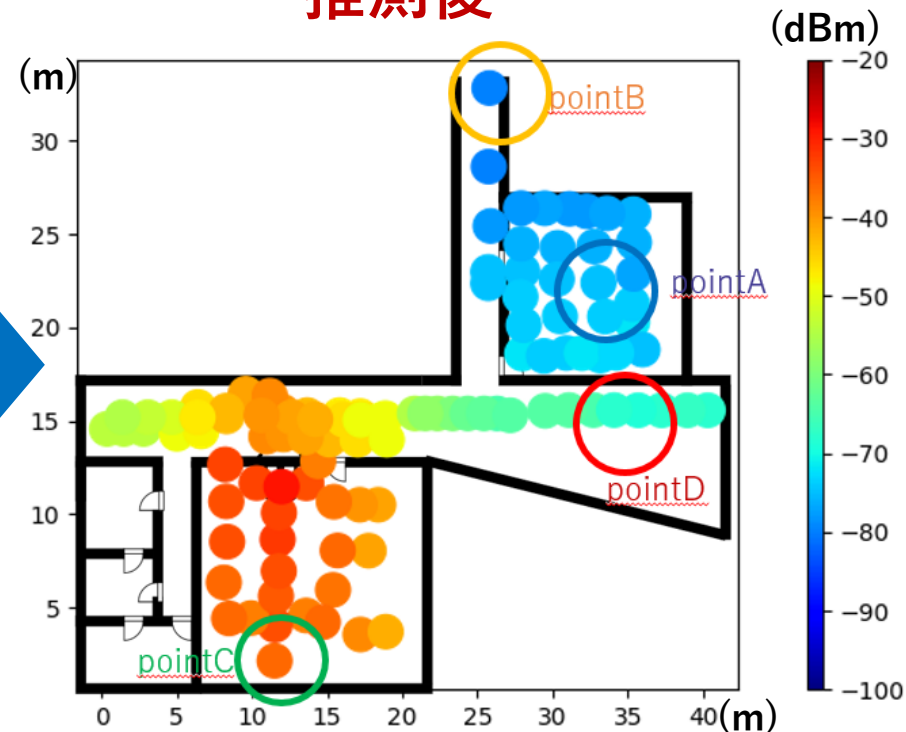
- 両方式で観測点が全体の約1/3より少なくなると誤差が顕著に増加 (A: 観測点が8以下, B: 観測点が35以下)
- グラフの形は類似しているが, **Aが全体的に約0.5dBm低い**
- APを用いた従来手法<sup>[1]</sup>は環境Bと類似する環境で **82個の推測点**に対して**0.85dBmのRMSE**で推測 (<sup>[1]</sup>はAPの情報を活用する方式であり、誤差が半分程度となっている)

# 推測例

## 推測前 (40推測点)

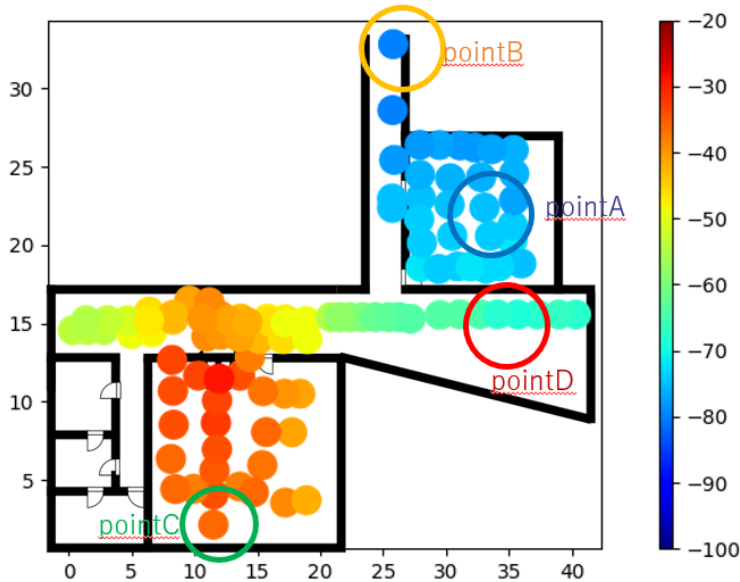


## 推測後

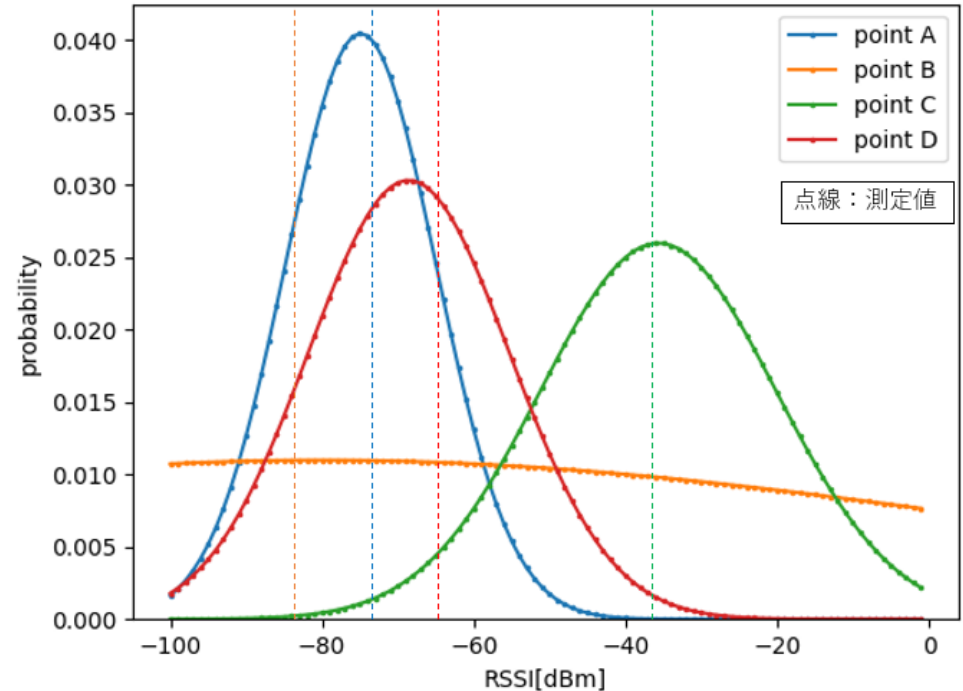


- 推測点に対して周囲の観測点を参考に推測が行われ、**平滑なマップを作成** (全体でRMSEが約1.7dBm)
- 4地点について推定値の**確率分布を評価**する (次スライド)

# 推定値の確率分布



## 点A,B,C,Dの推測確率分布



- 確率分布での推測が行われ、**分布の形(分散)**を見ることで値の**精度を表示**
- 一般的に周囲に**観測点が多いほど精度が高い(分布が狭い)**ことを確認
- 実用では、**値だけでなく精度の高さ**に注目して利用することが可能
  - Ex1. **RSSが-60dBm以上ある確率80%以上**あるエリアを求める
  - Ex2. ロボットの移動においてRSSの推定値が同じであれば  
**分布が狭い経路を優先**する

# まとめ

本研究は以下の貢献をした

- 推測値を確定値ではなく確率分布で表示することにより値の精度にも注目することができた
- 観測点が多くすれば精度が向上するとは限らない  
(本手法では推測点が全体の約1/3を下回ると精度が顕著に低下)
- 提案手法
  - マルコフ確率場を利用した確率的なデジタルツインの構築
    - 確率的に場のRSSを推測したい
    - APを利用せずに推測したい
- 評価
  - エリアの観測点を減らしたときの精度の変化
  - 推測における確率分布の表示

# 今後の課題

- 達成した課題
  - APの情報に依存しない推測手法
  - 推測したRSSの信頼性を明確化
- 現時点の問題点と今後の課題
  - **従来手法との精度差**
    - 精度を向上させるための検討
      - 電波の送信方向の考慮
      - よりロバストなパラメータ設計手法の検討
  - 今回検討しきれなかった課題
    - **空間的特性に左右されない電波状況の可視化**
      - 障壁の考慮（減衰・反射・回折）
    - **時間的情況の変化への対応**
      - 時間による電波状況の変化に対応した設計
      - 時間が経った観測値の信頼度を減少させる設計

# 参考文献

---

- [1] F. Yin and F. Gunnarsson, "Distributed Recursive Gaussian Processes for RSS Map Applied to Target Tracking," in IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 11, no. 3, pp. 492-503, April 2017, doi: 10.1109/JSTSP.2017.2678105.
- [2] 松田崇弘, 小野文枝, 原晋介, 小島史秀, 三浦龍, “ブラフフラシアンを用いた受信信号強度マップの逐次推定手法”, 信学技報, vol. 119, no. 101, CS2019-41, pp. 127-132, 2019年7月

# 研究業績

---

- 2023年1月：NS研究会での報告
  - title：屋内環境でのwi-fiの電波状況を推測する無線通信空間の確率的デジタルツイン構築の研究