

Wi-Fi電波強度分布を利用した 位置推定システム



九州大学 工学研究院海洋システム工学部門 木村 元

九州大学 工学部地球環境工学科 福元寛大

背景

あらゆる工場内やオフィス内において、
今やWi-Fiがインフラとして普通に整備
されている



Wi-Fi接続対象領域内では、通信に支障が無いよう
-70[dBm]以上の電波強度になるようアクセスポイント
が設置されている

→ 通信に必要なあるいは可能なアクセスポイント
の電波以外にも、**通信に使用できない弱い電波強
度のビーコンを無数に受信**

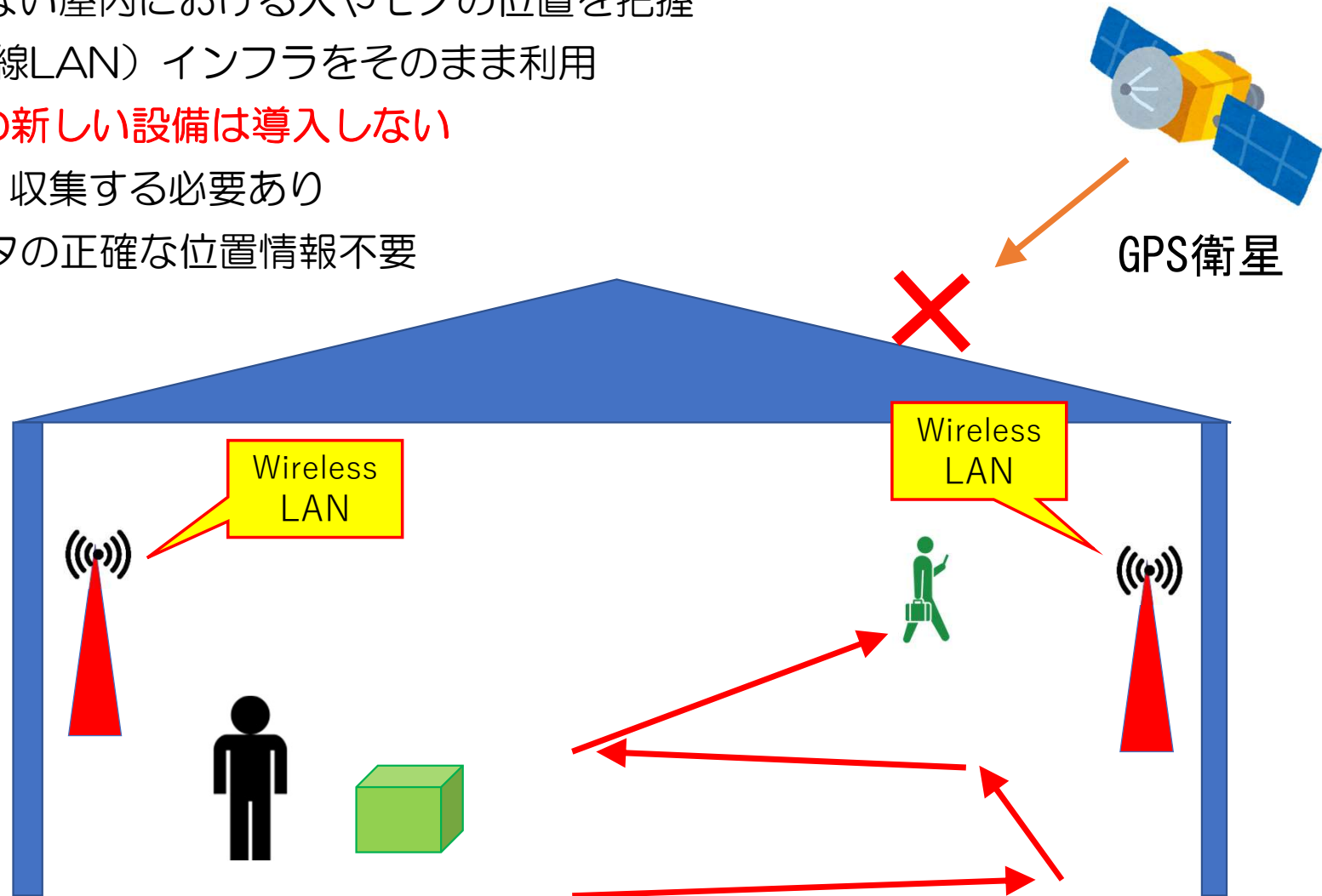
(場合によっては数十から200以上)

この情報を利用できないか？



目的





- GPSを利用できない屋内における人やモノの位置を把握
- 既存のWi-Fi（無線LAN）インフラをそのまま利用
位置把握のための新しい設備は導入しない
- 電波強度を計測・収集する必要あり
／無線LANルータの正確な位置情報不要



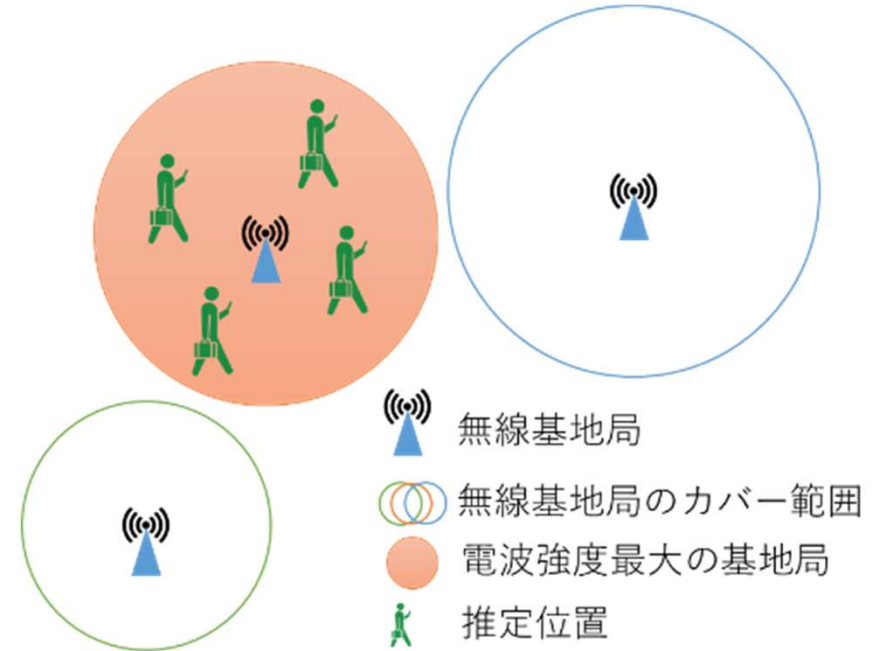
既存のWi-Fi利用位置検出方法

(A) Triangulation

アクセスポイントの位置と電波強度は既知として計算

-  無線基地局
-  電波強度から算出される距離
-  利用者の存在しうる地点
-  推定位置

(B) Proximity エリア内部での位置は分からない



対象領域中の複数の位置でシーンの観測を行い、データベースあるいは機械学習を事前に構築し、位置推定に用いる
本研究の手法もコレ

(C) Scene Analysis

グラフ(青)：学習されたシーン
グラフ(緑)：観測されたシーン

電波強度分布モデルの検討

モバイル機器で観測される電波強度 y [dB]は、 $x = 10^{\frac{y}{10}}$ より x [mW]へ変換

一定周波数のキャリア（搬送波）に白色ノイズを乗せた電波強度分布[mW]は**指数分布**（電波工学の教科書より）

同一のBSSIDのWi-Fiの電波強度を同一地点で多数観測し、データから最尤推定した下記のモデルを有意水準 1 %でKS検定

正規分布モデル

母数は μ , σ の2個

指数分布モデル

母数は λ の1個

ワイブル分布モデル

母数は α , β の2個

電波強度分布モデルの検討

モバイル機器で観測される電波強度 y [dB]は、 $x = 10^{\frac{y}{10}}$ より x [mW]へ変換

一定周波数のキャリア（搬送波）に白色ノイズを乗せた電波強度分布[mW]は**指数分布**（電波工学の教科書より）

同一のBSSIDのWi-Fiの電波強度を同一地点で多数観測し、データから最尤推定した下記のモデルを有意水準 1 %でKS検定

正規分布モデル

0 %適合

関連研究の多くはコレ

指数分布モデル

ワイブル分布モデル

電波強度分布モデルの検討

モバイル機器で観測される電波強度 y [dB]は、 $x = 10^{\frac{y}{10}}$ より x [mW]へ変換

一定周波数のキャリア（搬送波）に白色ノイズを乗せた電波強度分布[mW]は**指数分布**（電波工学の教科書より）

同一のBSSIDのWi-Fiの電波強度を同一地点で多数観測し、データから最尤推定した下記のモデルを有意水準 1 %でKS検定

正規分布モデル 0 % 適合

関連研究の多くはコレ

指数分布モデル **38 % 適合**

「期待値」 = 「標準偏差」である必要あり

ワイブル分布モデル

電波強度分布モデルの検討

モバイル機器で観測される電波強度 y [dB]は、 $x = 10^{\frac{y}{10}}$ より x [mW]へ変換

一定周波数のキャリア（搬送波）に白色ノイズを乗せた電波強度分布[mW]は**指数分布**（電波工学の教科書より）

同一のBSSIDのWi-Fiの電波強度を同一地点で多数観測し、データから最尤推定した下記のモデルを有意水準1%でKS検定

正規分布モデル 0%適合

関連研究の多くはコレ

指数分布モデル 3.8%適合

「期待値」 = 「標準偏差」である必要あり



ワイブル分布モデル **96%適合**

電波強度分布モデルの検討

モバイル機器で観測される電波強度 y [dB]は、 $x = 10^{\frac{y}{10}}$ より x [mW]へ変換

一定周波数のキャリア（搬送波）に白色ノイズを乗せた電波強度分布[mW]は**指数分布**（電波工学の教科書より）

同一のBSSIDのWi-Fiの電波強度を同一地点で多数観測し、データから最尤推定した下記のモデルを有意水準 1 %でKS検定

正規分布モデル 0 % 適合

関連研究の多くはコレ

指数分布モデル 3.8 % 適合

「期待値」 = 「標準偏差」である必要あり



ワイブル分布モデル 96 % 適合



本研究では**電波強度分布をワイブル分布**として計算

【参考】ワイブル分布(Weibull distribution)とは

指数分布の拡張 母数パラメータは2個

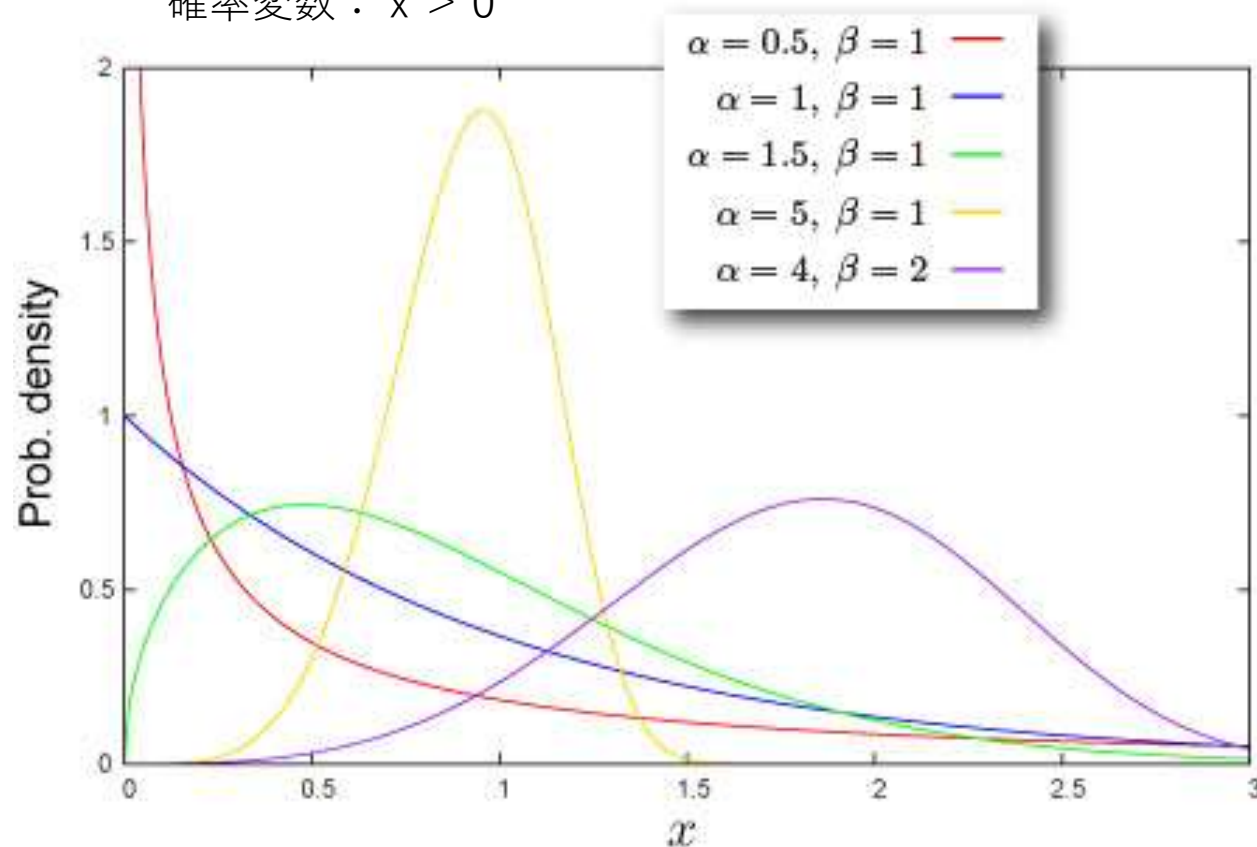
確率密度関数
$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}$$

形状パラメータ： $\alpha > 0$ ($\alpha = 1$ は指数分布)
尺度パラメータ： $\beta > 0$
確率変数： $x > 0$

ワイブル分布は、初期故障型 ($\alpha < 1$) や偶発故障型 ($\alpha = 1$)、摩耗型故障 ($\alpha > 1$) などの故障発生までの時間のモデルとして利用される。

期待値 (平均値)
$$E(x) = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$$

分散
$$V(x) = \beta^2 \left(\Gamma\left(\frac{\alpha+2}{\alpha}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right]^2 \right)$$



各観測点でのサンプルからのワイブル分布の最尤推定

ワイブル分布に従う確率変数の n 個のサンプルを x_1, x_2, \dots, x_n と表すと、対数尤度関数 L は

$$L = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i) = n \ln \alpha - n\alpha \ln \beta + (\alpha - 1) \sum_{i=1}^n \ln x_i - \frac{1}{\beta^\alpha} \sum_{i=1}^n (x_i)^\alpha$$

対数尤度 L を最小化する α, β は以下の尤度方程式を満たす：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \alpha} L = \frac{n}{\alpha} - n \ln \beta + \sum_{i=1}^n \ln x_i + \frac{\ln \beta}{\beta^\alpha} \sum_{i=1}^n (x_i)^\alpha + \frac{1}{\beta^\alpha} \sum_{i=1}^n \ln x_i (x_i)^\alpha = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \beta} L = -\frac{n\alpha}{\beta} + \frac{\alpha}{\beta^{\alpha+1}} \sum_{i=1}^n (x_i)^\alpha = 0 \end{cases}$$

上の式を整理すると

$$\begin{cases} \beta = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^\alpha \right)^{\frac{1}{\alpha}} \\ \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i)^\alpha \ln x_i}{\sum_{i=1}^n (x_i)^\alpha} = 0 \end{cases}$$

この式を α について数値的に求めてから上の式より β を得る。
この解 α, β がデータサンプルより得る未知母数 α, β の最尤推定値である

非線形方程式の数値解法にはニュートン法や2分法があるが、
本研究のシステムでは2分法を用いた（プログラムが簡単だったから）

提案手法のワイブル分布モデルでの電波強度マップデータ処理

各計測点において
BSSID毎に電波受信強度
のサンプル[mW]計測

全ての試行で
電波強度を観測

電波受信強度のサンプル
からワイブル分布の α ,
 β を最尤推定

電波強度の観測に失敗した試
行がある場合
= 未知データを含むデータ

最尤推定は不可能

提案手法のワイブル分布モデルでの電波強度マップデータ処理

各計測点において
BSSID毎に電波受信強度
のサンプル[mW]計測

全ての試行で
電波強度を観測

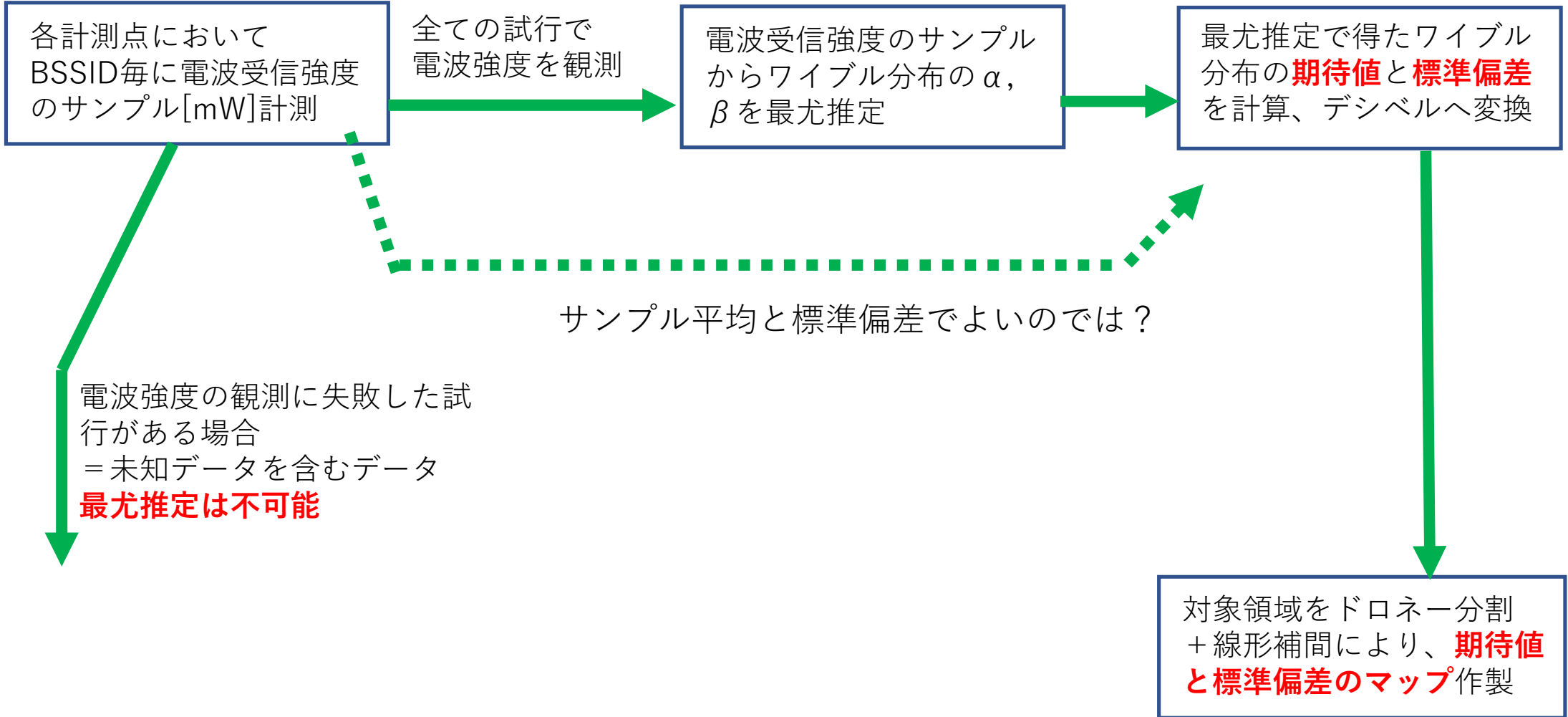
電波受信強度のサンプル
からワイブル分布の α ,
 β を最尤推定

最尤推定で得たワイブル
分布の**期待値**と**標準偏差**
を計算、デシベルへ変換

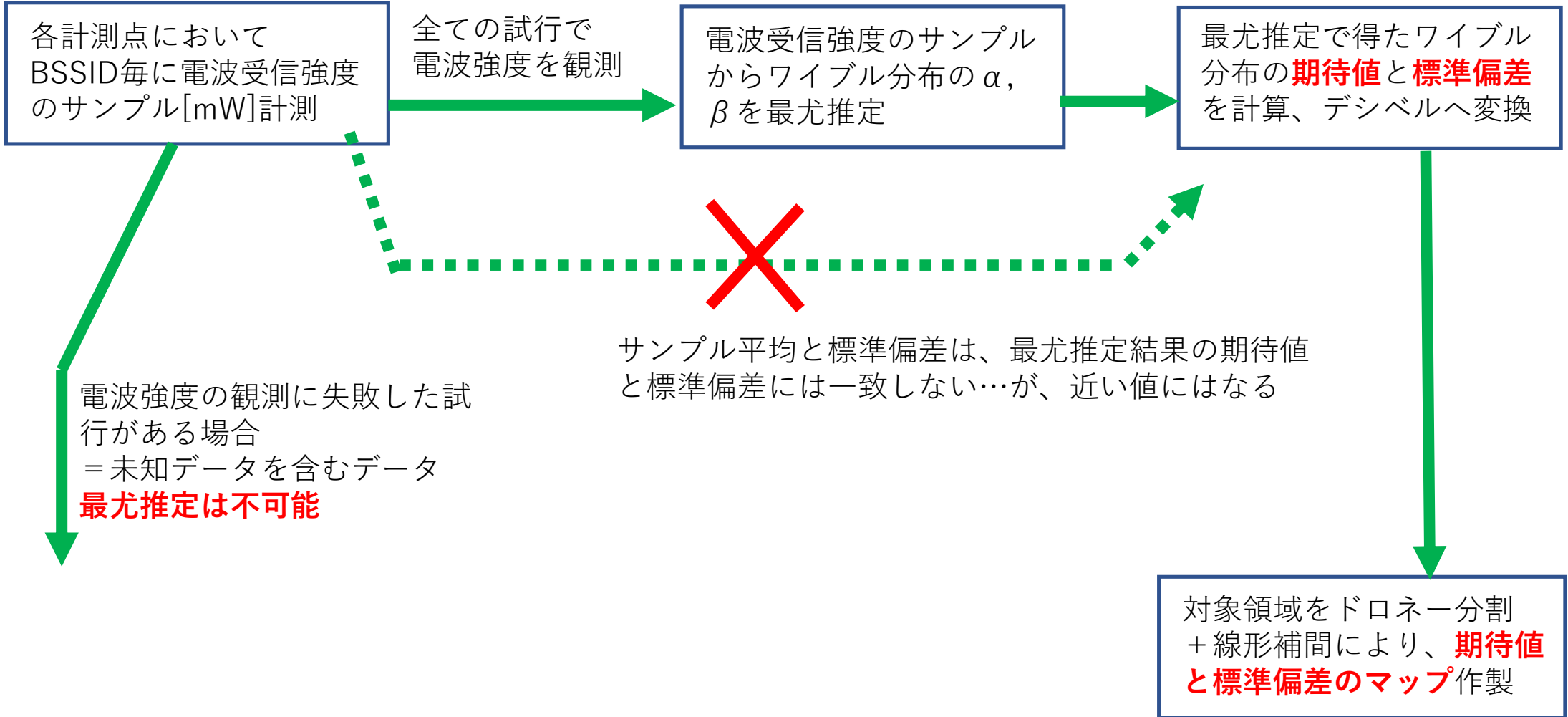
電波強度の観測に失敗した試
行がある場合
= 未知データを含むデータ
最尤推定は不可能

対象領域をドロネー分割
+ 線形補間により、**期待値**
と**標準偏差のマップ**作製

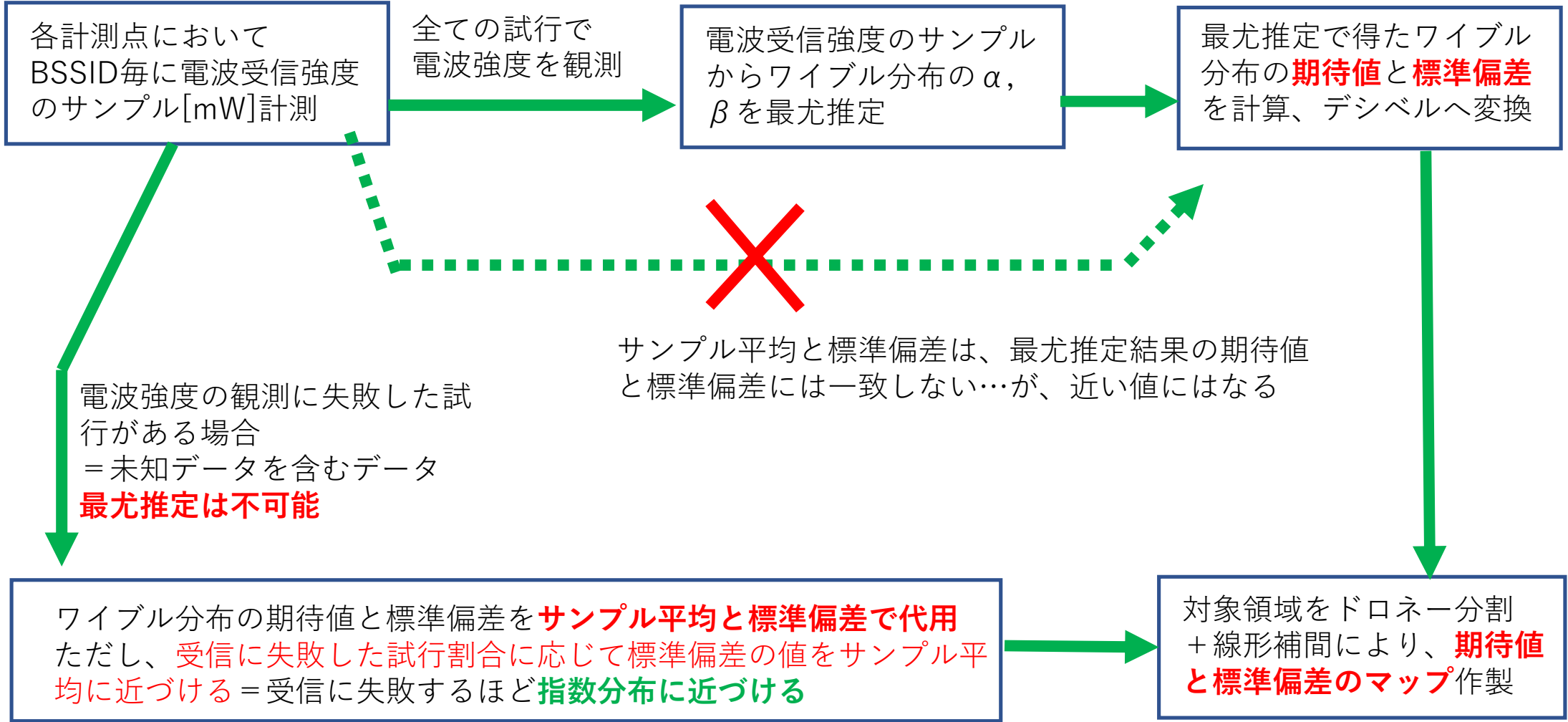
提案手法のワイブル分布モデルでの電波強度マップデータ処理



提案手法のワイブル分布モデルでの電波強度マップデータ処理

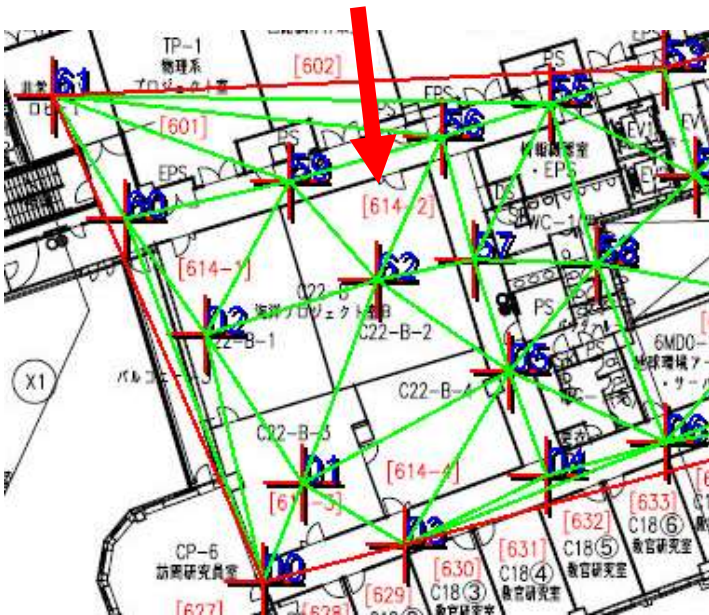


提案手法のワイブル分布モデルでの電波強度マップデータ処理

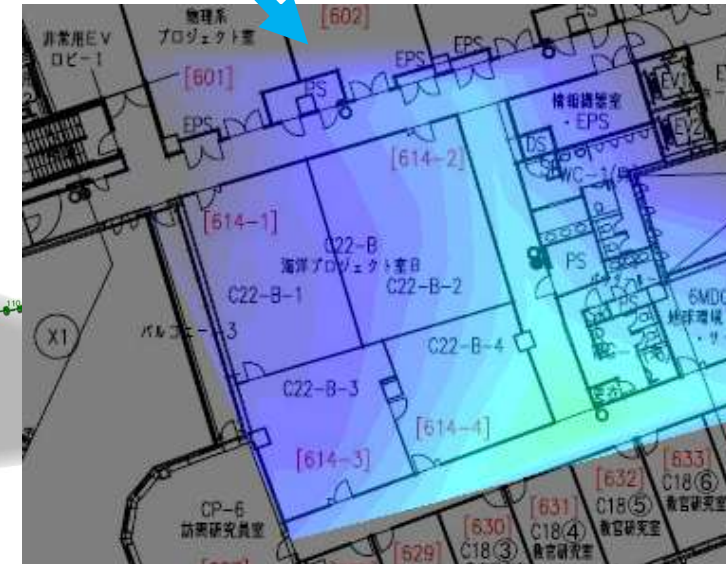
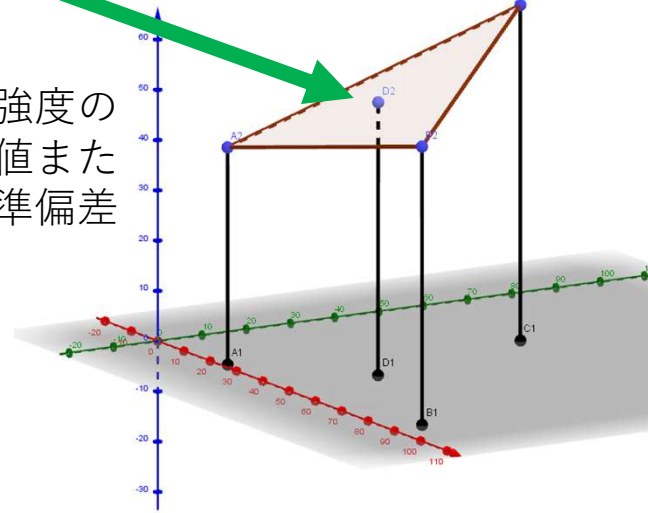


位置推定処理手順の提案

- (1) 対象領域内の複数の観測点において、Wi-Fiの電波強度をサンプルとして観測
各観測点毎に、受信した全てのBSSIDの強度分布を **ワイブル分布** としてサンプルから最尤推定
この最尤推定結果の各BSSIDの α , β から電波強度の **期待値と標準偏差を計算しデシベルへ変換**
- (2) 上記の全観測点のBSSID毎の電波強度[dBm]の期待値と標準偏差について、観測点を母点とした **ドロネー分割** で **線形補間** し、電波強度の **期待値マップ** と **標準偏差マップ** を作製

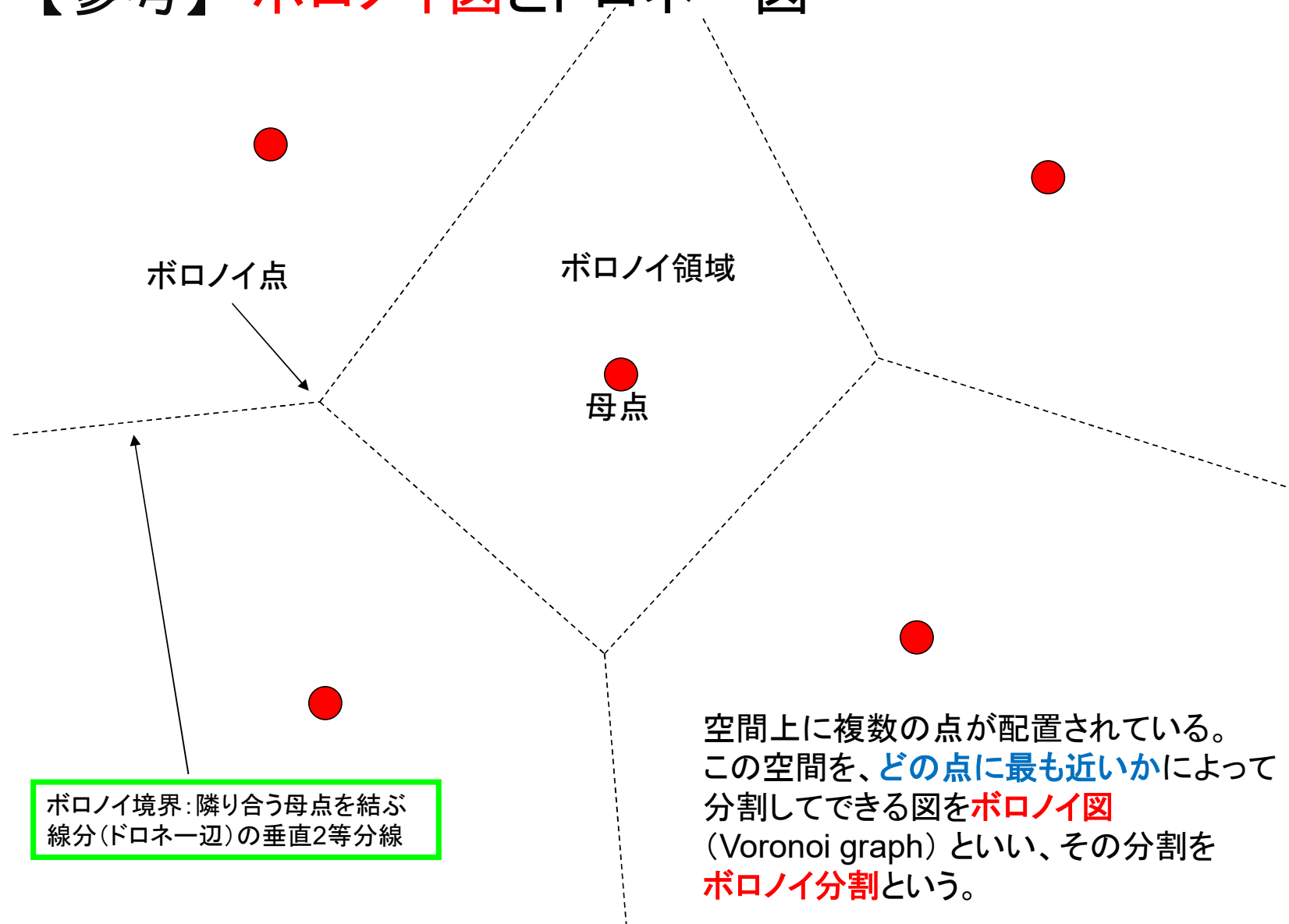


電波強度の
期待値または
標準偏差

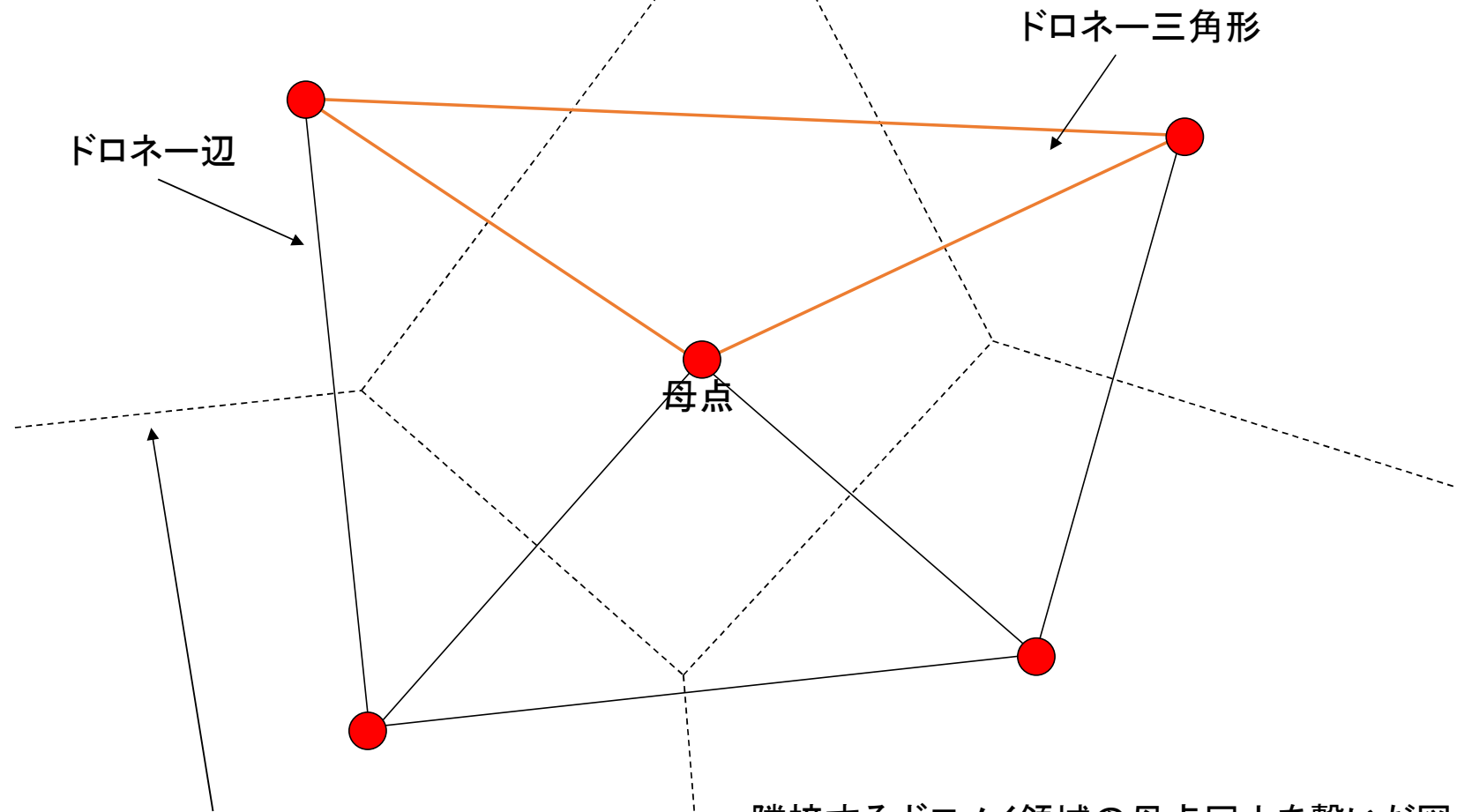


- (3) 位置推定対象のモバイル機器が受信した電波強度データの確率密度関数値 (**ワイブル分布の結合分布**) を上記マップ上の全ての位置で計算し、最大値となる場所を位置推定結果とする。

【参考】 **ボロノイ図**とドロネー図



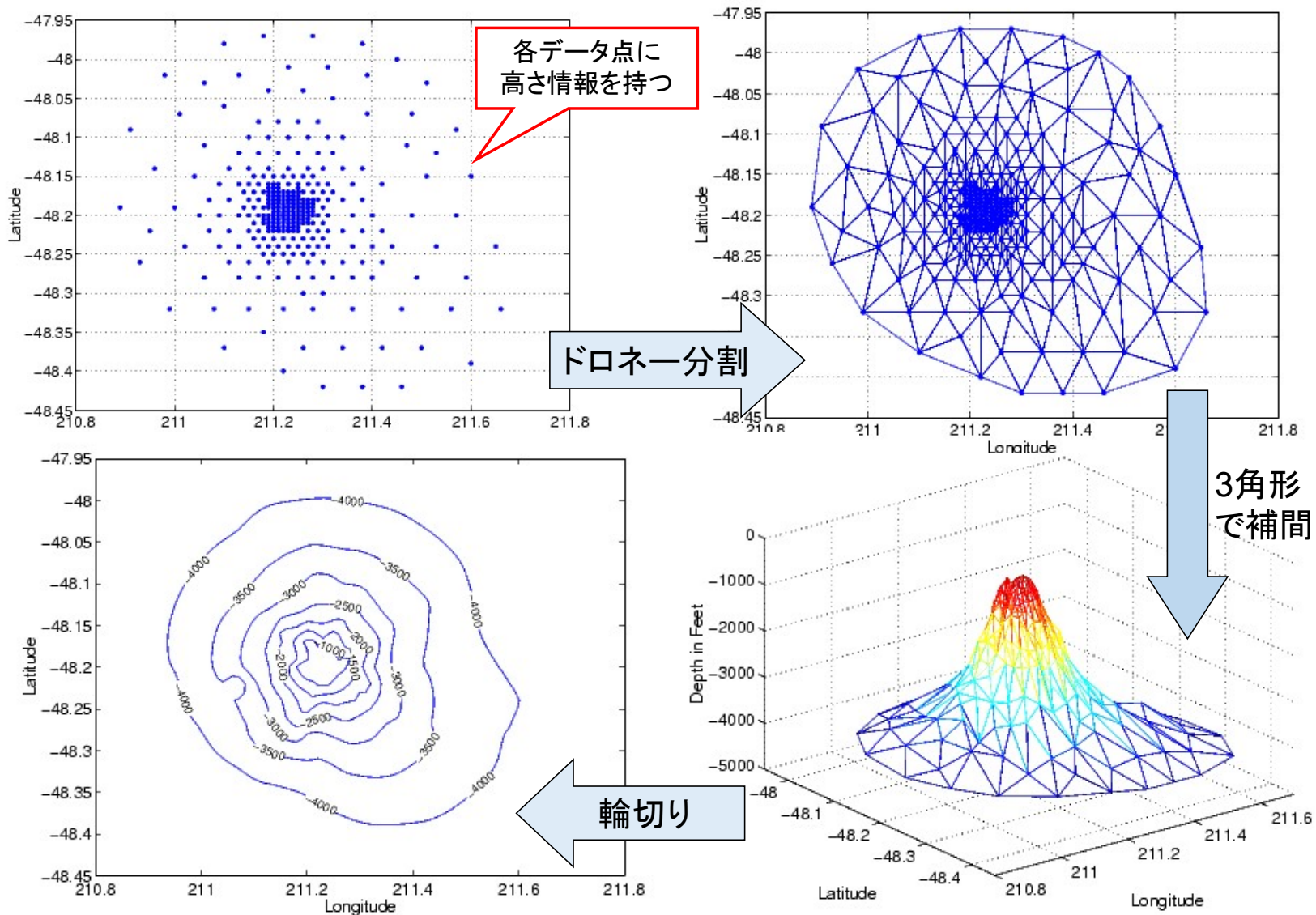
【参考】 ボロノイ図とドロネー図



ボロノイ境界: 隣り合う母点を結ぶ線分(ドロネー辺)の垂直2等分線

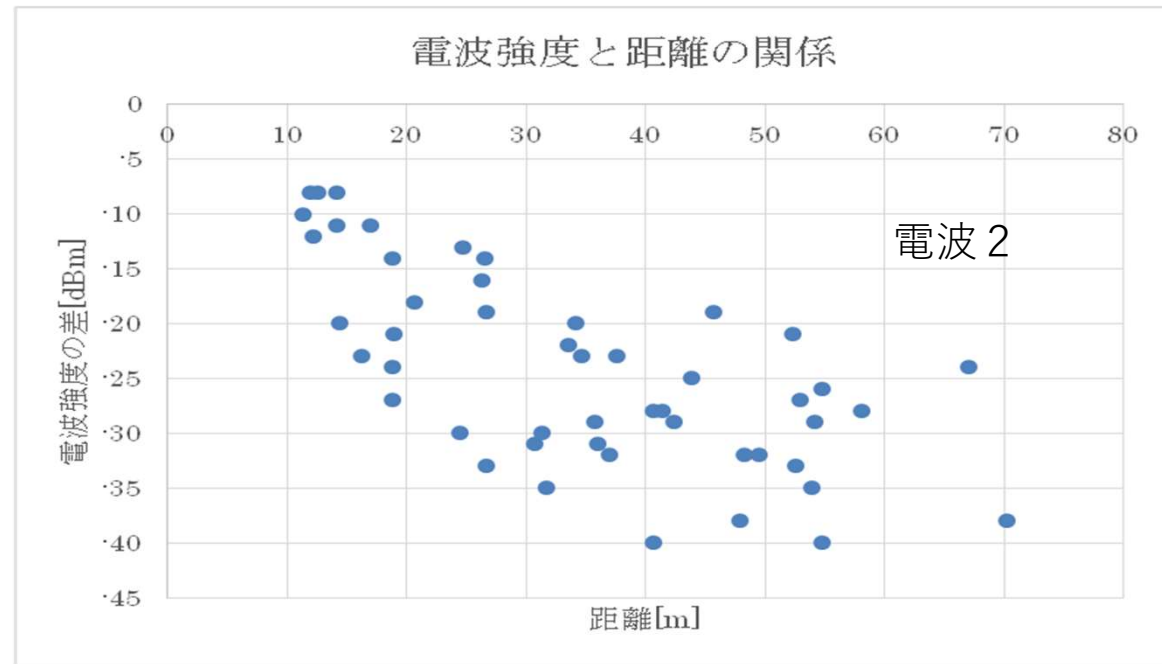
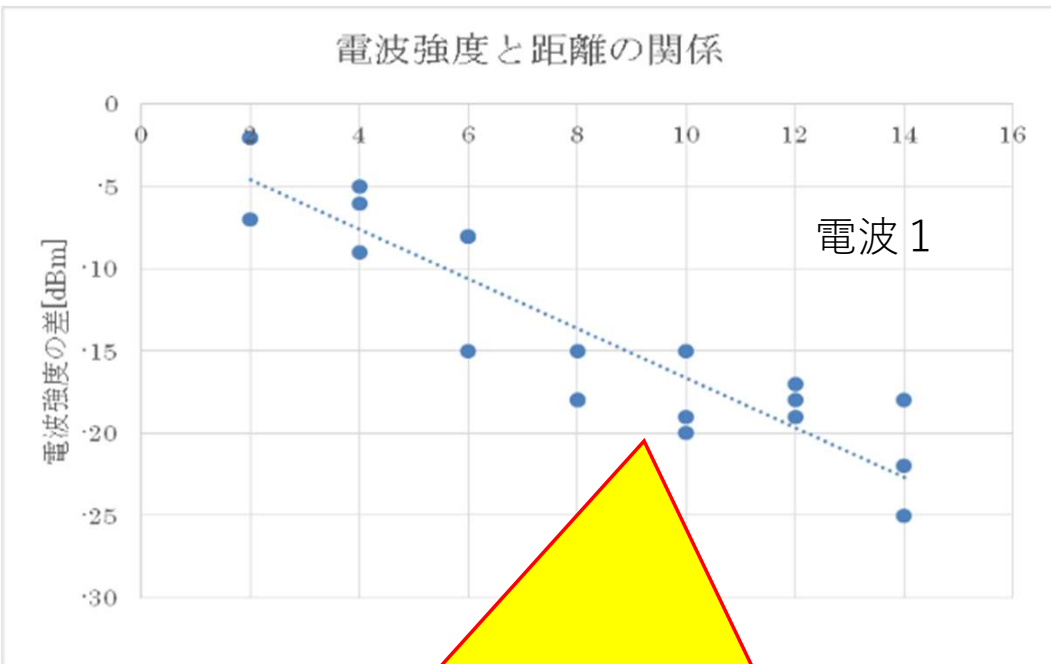
隣接するボロノイ領域の母点同士を繋いだ図を**ドロネー図**(Delaunay graph)と呼び、この空間分割を**ドロネー3角形分割**という。

【参考】 ドローネー図を利用した散布データの補間



ニューラルネット
による関数近似より
ずっと合理的

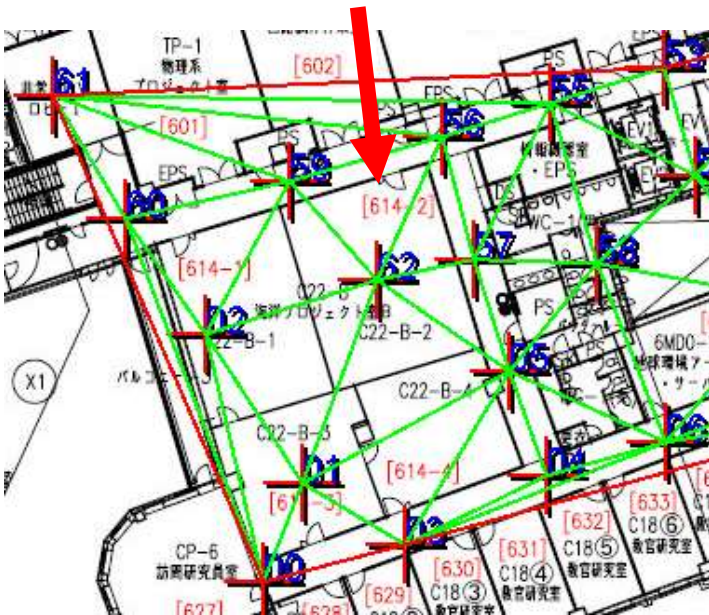
最尤推定結果から電波強度の期待値と標準偏差を計算した後、デシベルに変換してから線形補間する理由



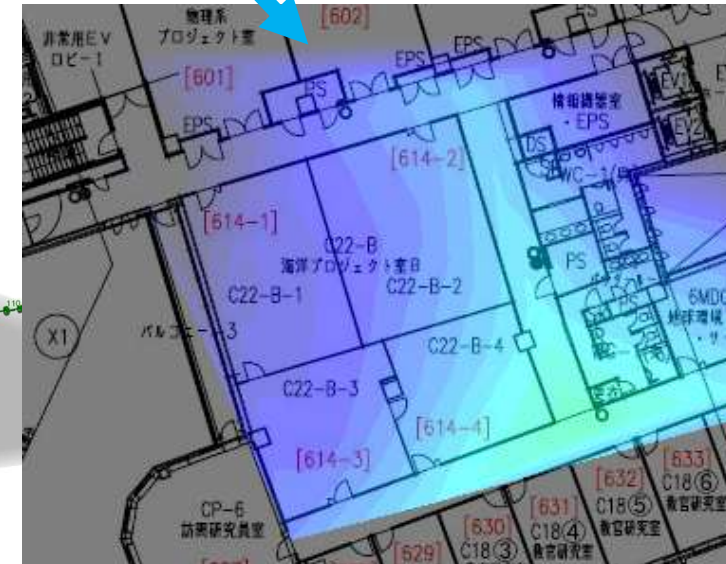
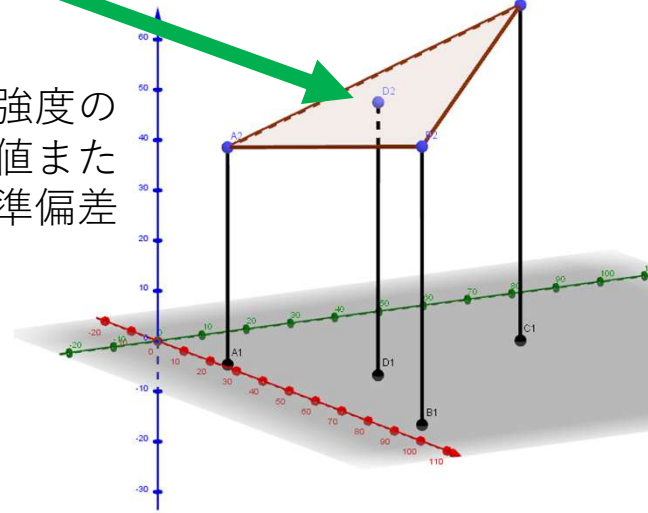
電波強度をデシベルで扱うと、電波強度と距離との関係が線形性を示すので、「ドロネー分割+線形補間」による電波強度（期待値と標準偏差）マップの近似精度が優れる

位置推定処理手順の提案

- (1) 対象領域内の複数の観測点において、Wi-Fiの電波強度をサンプルとして観測
各観測点毎に、受信した全てのBSSIDの強度分布を **ワイブル分布** としてサンプルから最尤推定
この最尤推定結果の各BSSIDの α , β から電波強度の **期待値と標準偏差を計算しデシベルへ変換**
- (2) 上記の全観測点のBSSID毎の電波強度[dBm]の期待値と標準偏差について、観測点を母点とした **ドロネー分割** で **線形補間** し、電波強度の **期待値マップ** と **標準偏差マップ** を作製



電波強度の期待値または標準偏差

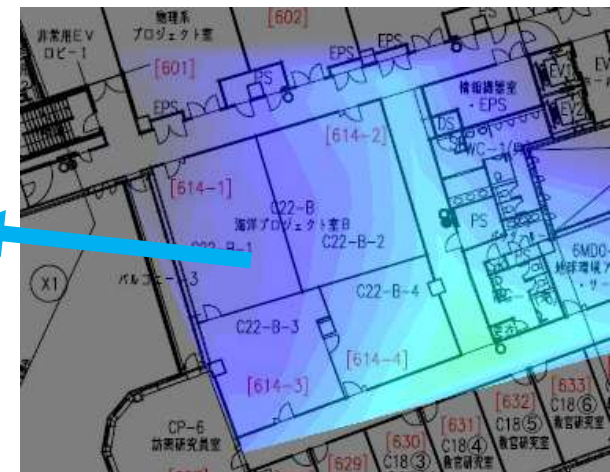


- (3) 位置推定対象のモバイル機器が受信した電波強度データの確率密度関数値 (**ワイブル分布の結合分布**) を上記マップ上の全ての位置で計算し、最大値となる場所を位置推定結果とする。

提案手法の電波強度マップからクエリ電波の確率密度関数値を計算する処理手順

あるBSSIDのクエリの電波強度が x であるとき、
同BSSIDのマップ上の「ある位置」でのワイブル分布関数値は

- 1) その「ある位置」での期待値[dBm]と標準偏差[dBm]をマップから読み取り、
期待値 E [mW] および標準偏差 σ [mW] に変換



提案手法の電波強度マップからクエリ電波の確率密度関数値を計算する処理手順

あるBSSIDのクエリの電波強度が x であるとき、
同BSSIDのマップ上の「ある位置」でのワイブル分布関数値は

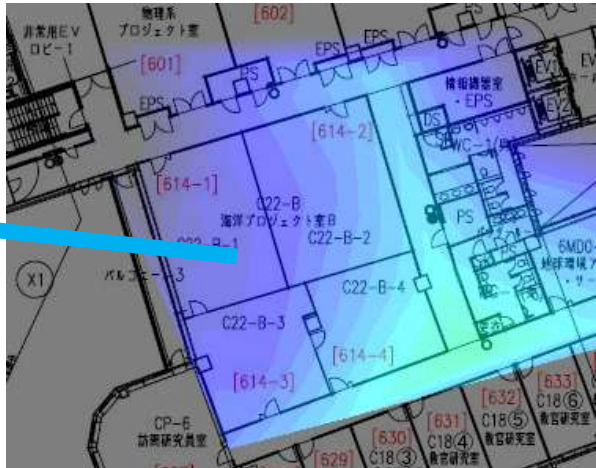
- 1) その「ある位置」での期待値[dBm]と標準偏差[dBm]をマップから読み取り、
期待値 E [mW] および標準偏差 σ [mW] に変換
- 2) E と σ から、ワイブル分布の母数 α と β を逆算

ワイブル分布の
期待値 (平均値)

$$E = \beta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right)$$

ワイブル分布
の分散

$$V = \sigma^2 = \beta^2 \left(\Gamma \left(\frac{\alpha + 2}{\alpha} \right) - \left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \right]^2 \right)$$



この非線形連立方程式を数
値計算 (2分法) で解く

提案手法の電波強度マップからクエリ電波の確率密度関数値を計算する処理手順

あるBSSIDのクエリの電波強度が x であるとき、
同BSSIDのマップ上の「ある位置」でのワイブル分布関数値は

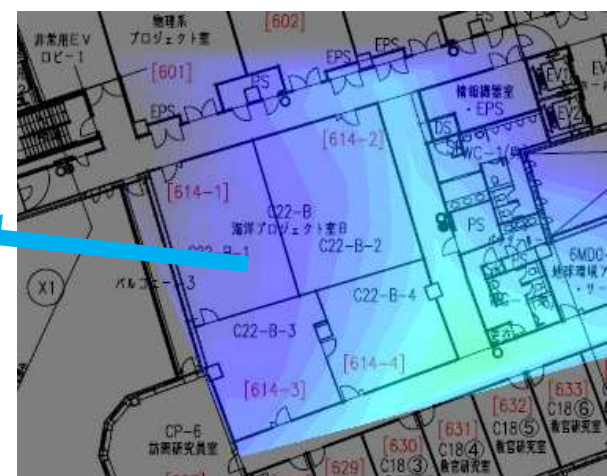
- 1) その「ある位置」での期待値[dBm]と標準偏差[dBm]をマップから読み取り、
期待値 E [mW] および標準偏差 σ [mW] に変換
- 2) E と σ から、ワイブル分布の母数 α と β を逆算

ワイブル分布の
期待値 (平均値)

$$E = \beta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right)$$

ワイブル分布
の分散

$$V = \sigma^2 = \beta^2 \left(\Gamma \left(\frac{\alpha + 2}{\alpha} \right) - \left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \right]^2 \right)$$



この非線形連立方程式を数
値計算 (2分法) で解く

- 3) 求めた α と β のワイブル分布からクエリの電波強度 x の確率密度関数値 $f(x)$ を計算

確率密度関数

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta} \right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta} \right)^\alpha}$$

- 4) クエリが受信した全てのBSSIDで $f(x)$ を計算し、積を計算

その他実用上の工夫など

受信可能最小電波強度の設定： 全受信データからBSSID毎に自動設定
(周波数などによって異なるため、BSSID毎に設定)

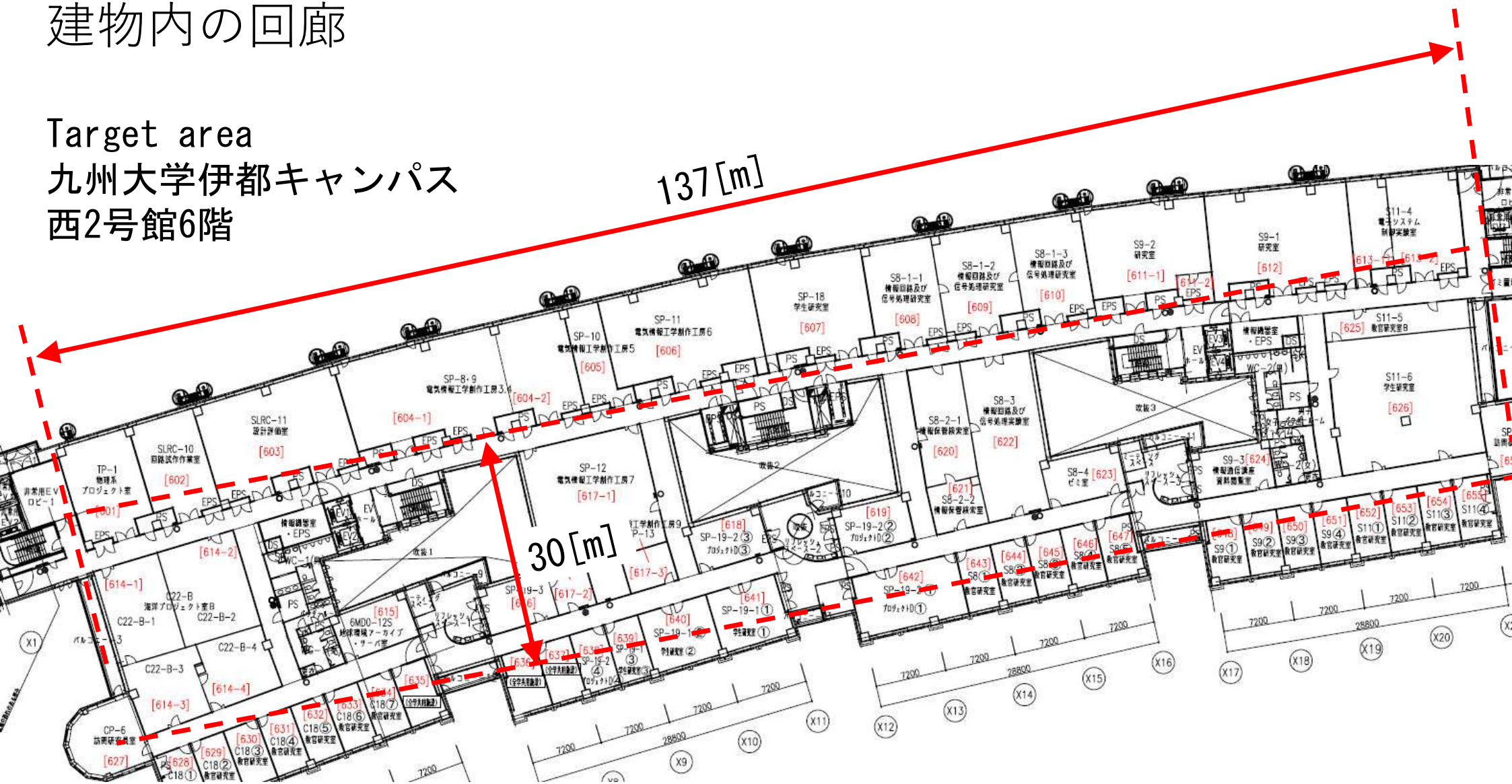
電波強度が弱いと、電波受信を試行しても受信に失敗するケースがある
= 観測不能なデータ発生

→ 電波強度分布を**最尤推定できない**

- 1) サンプルからの最尤推定をあきらめ、期待値と標準偏差を**サンプルの統計量で代用**
- 2) 電波受信に失敗した割合に応じて標準偏差を平均値へ近づける
(= 指数分布に近づける = 分散を大きく)

実験1：十数メートル毎にアクセスポイントが設置された建物内の回廊

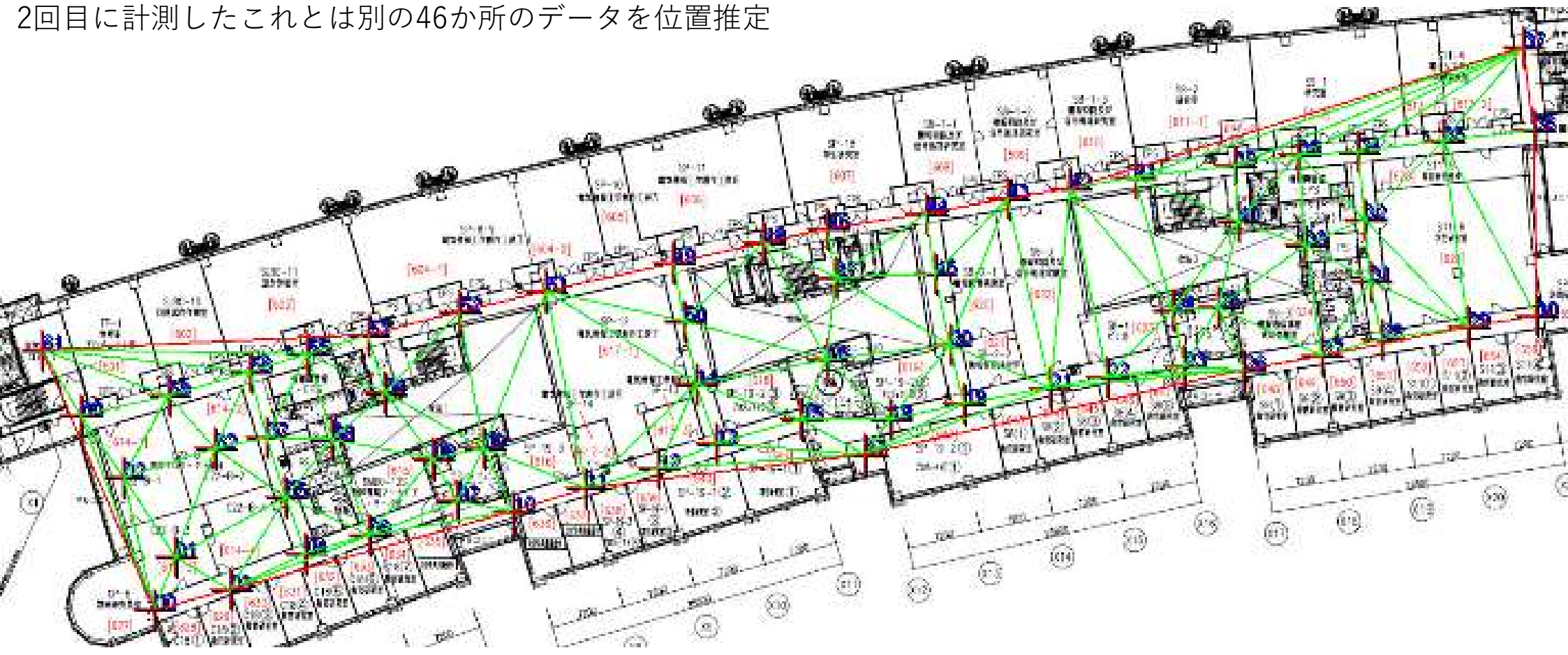
Target area
九州大学伊都キャンパス
西2号館6階



ウエスト2号館 6階の電波計測点とドローネー分割の様子
2020年8月1日計測

計測点は63か所（下の図）
1ヶ所あたり電波強度を25回（約2分半）計測

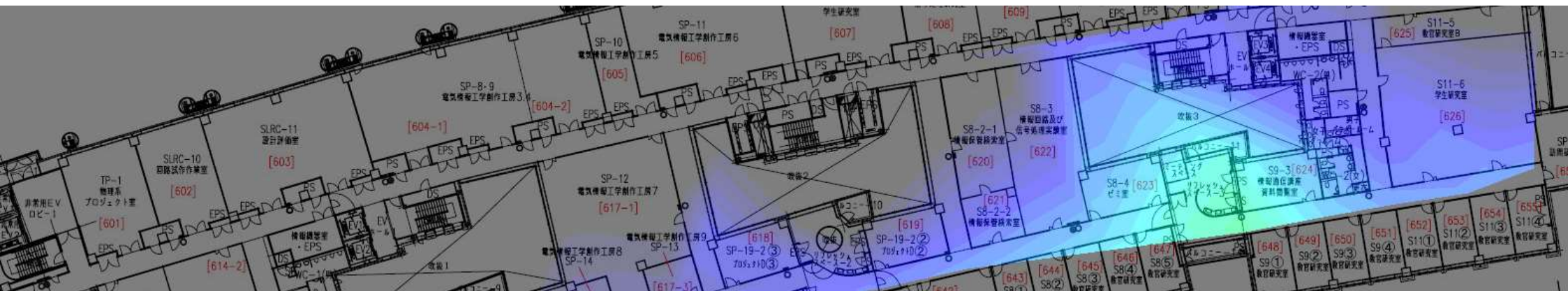
2回目に計測したこれとは別の46か所のデータを位置推定



Generated Wi-Fi Radio Intensity Maps (Total 686 maps)



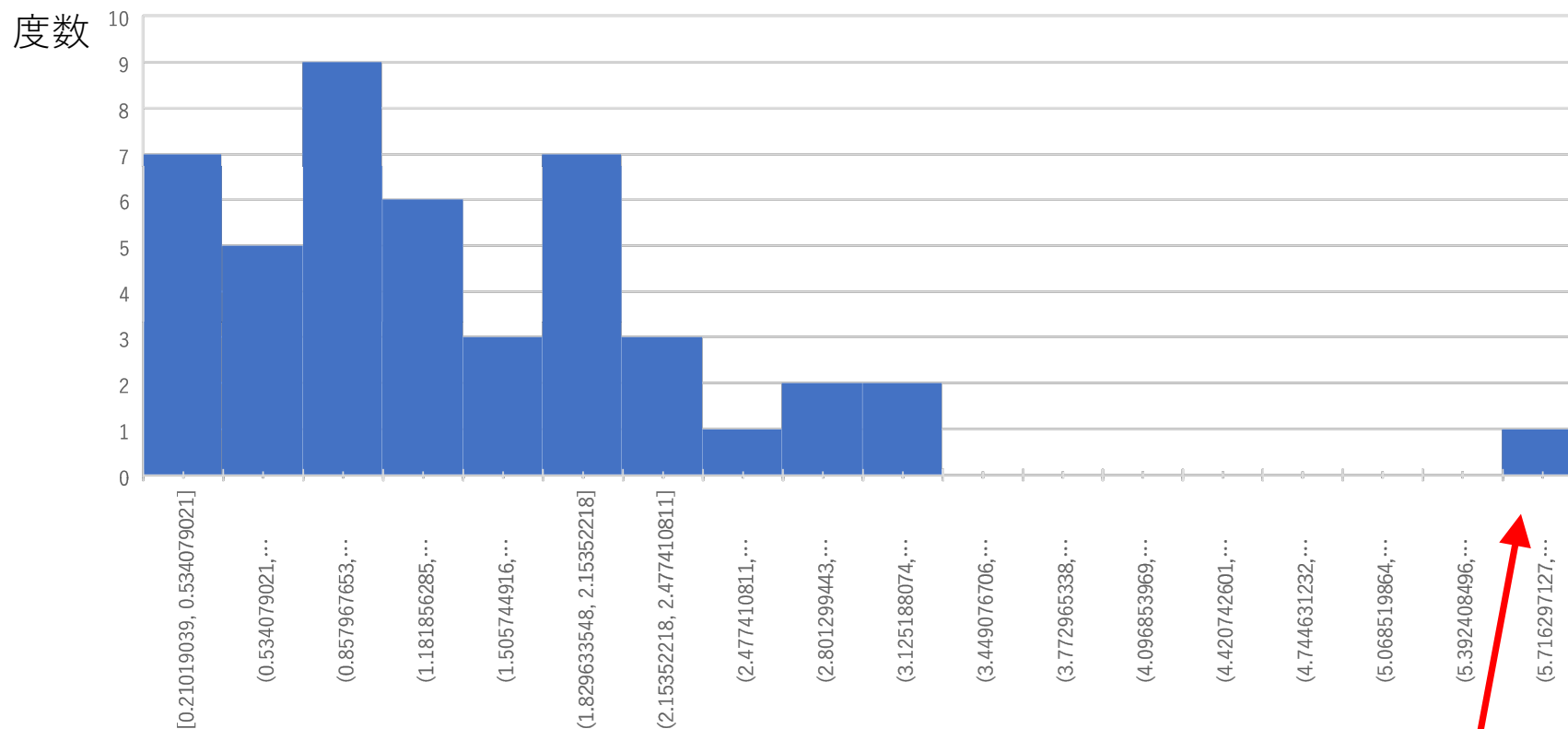
Radio intensity map of BSSID15



Radio intensity map of BSSID67

実験 1 : 推定結果の評価

推定位置の誤差のヒストグラム



ワイブル分布を仮定したモデルでの推定結果

推定誤差の平均 : 1.546[m] メジアン : 1.346[m]

誤差最大ケース : 6.040[m]

- + Estimated position
 - + True position
- The contour shows similarity,



ワイブル分布で推定誤差が最大だった6.04[m]ケースの推定結果（計測点102番）

- + Estimated position
 - + True position
- The contour shows similarity,



ワイルド分布で推定誤差が 0.846[m] ケースの推定結果の様子 (計測点106番)



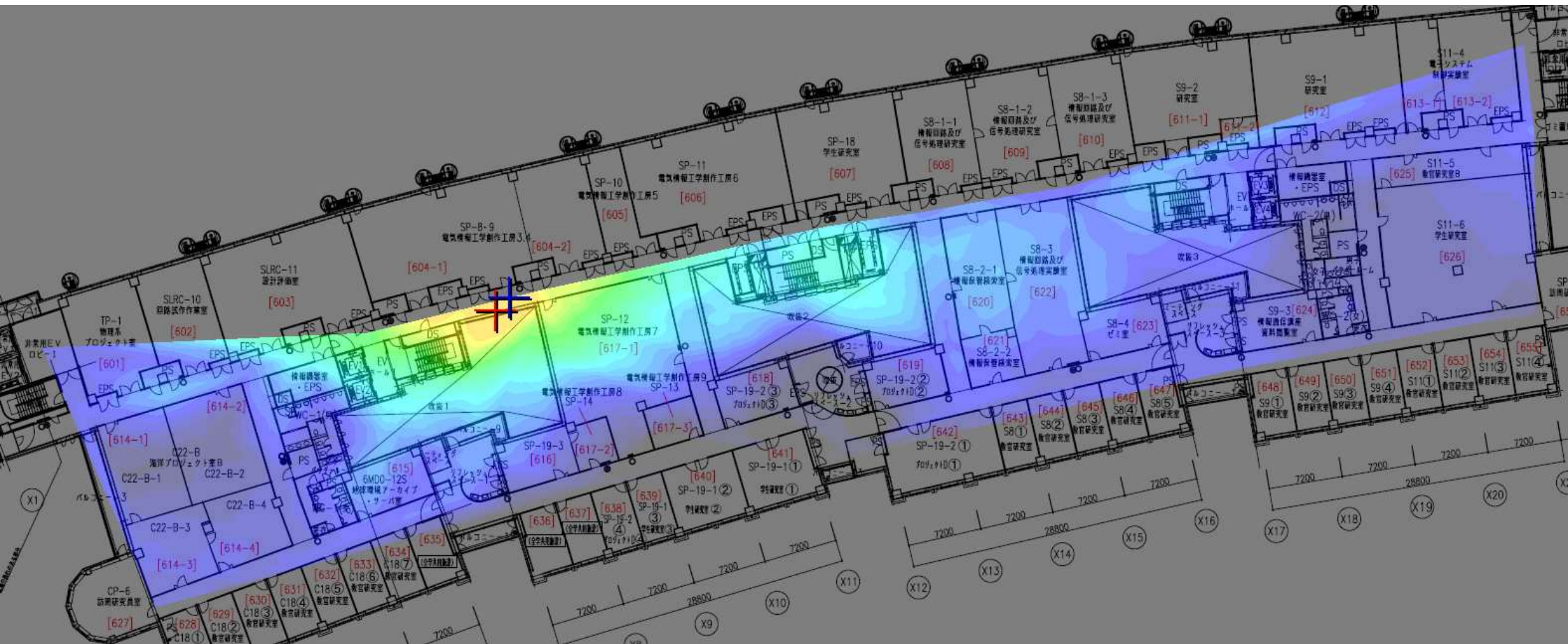




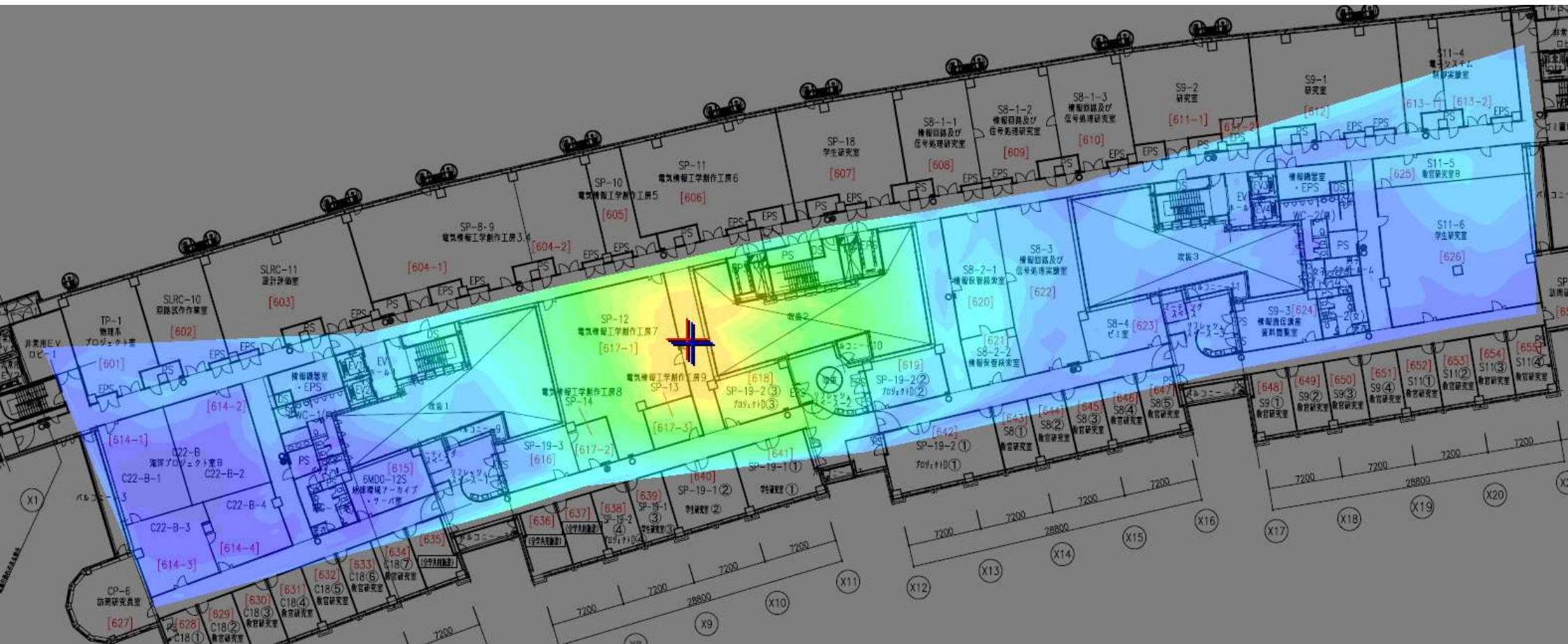


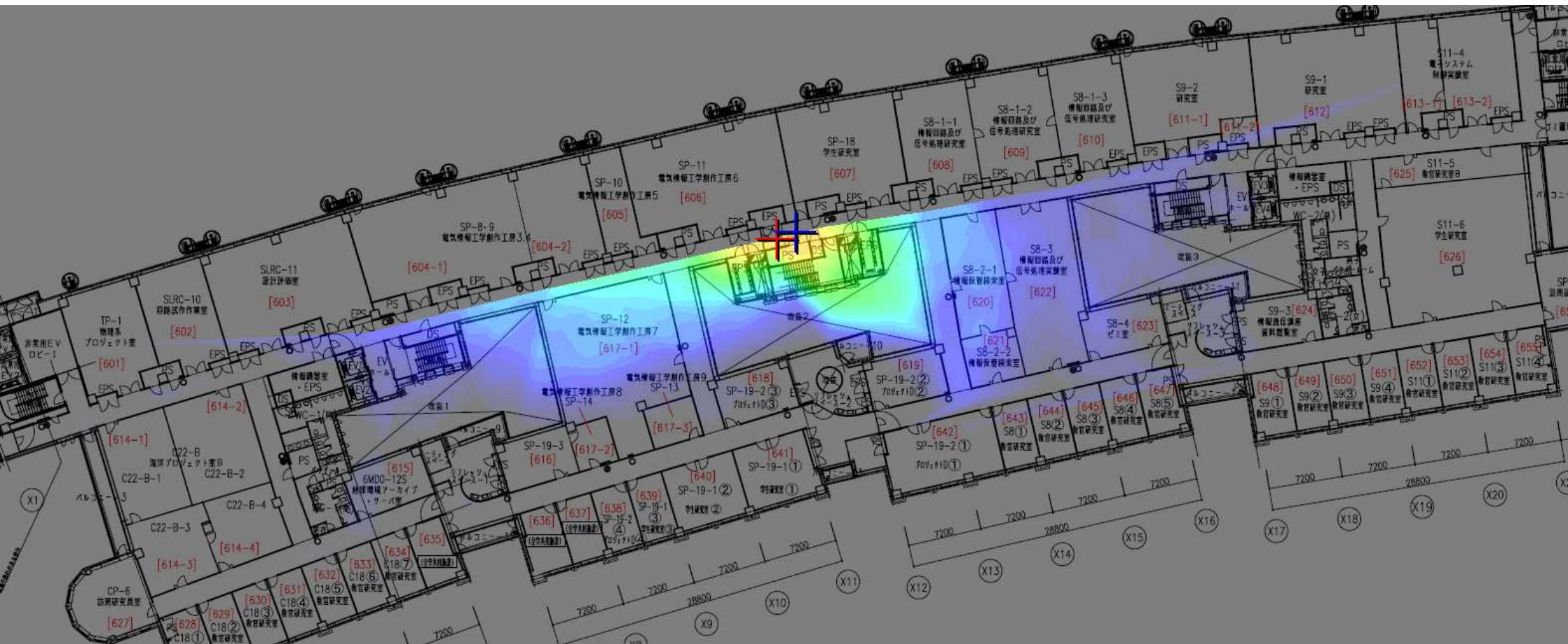




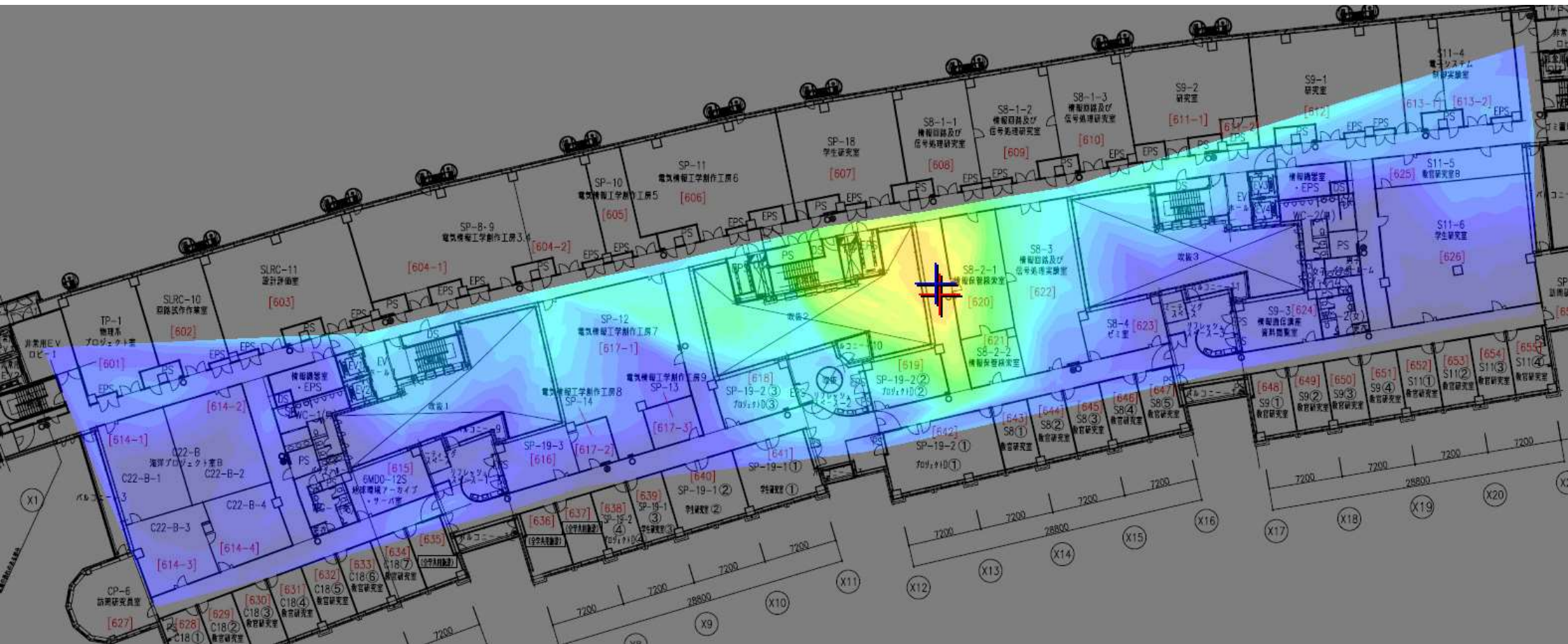


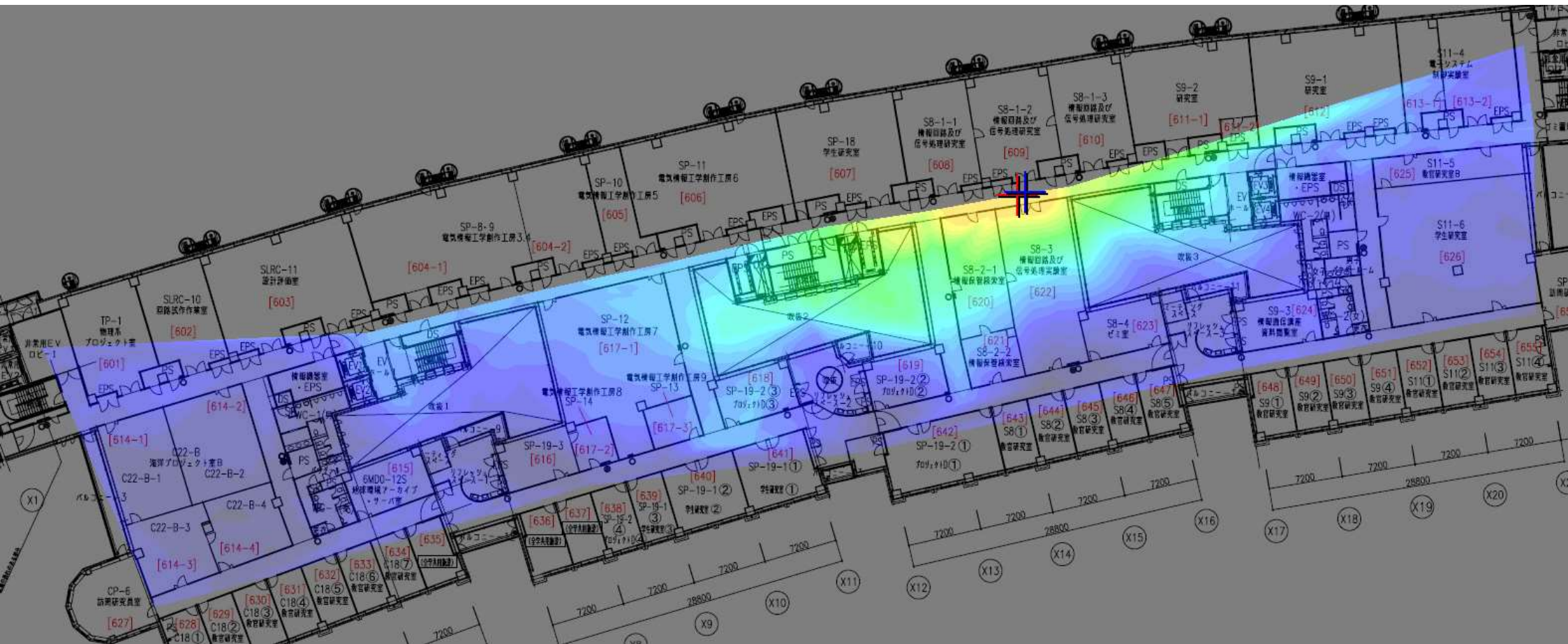




















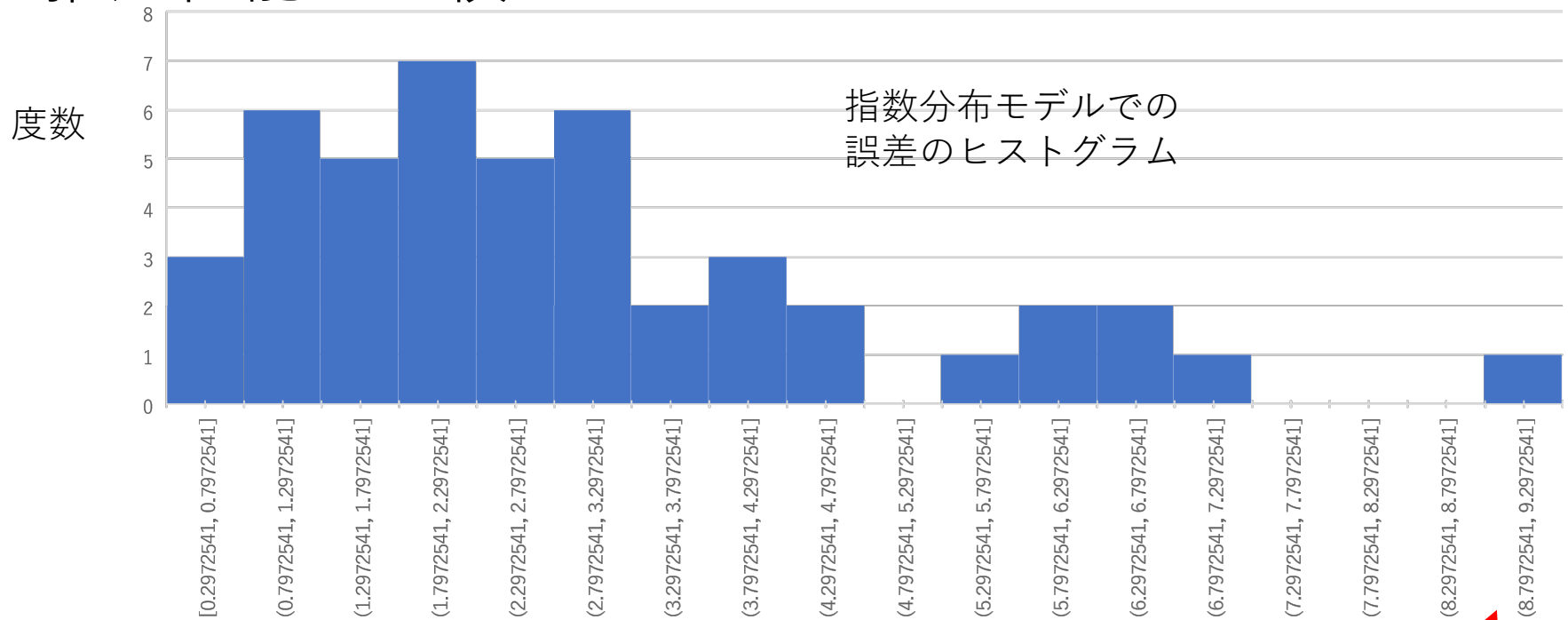






実験 1 : 推定性能の比較

推定位置の誤差のヒストグラム



ワイブル分布を仮定したモデルでの推定結果

推定誤差の平均 : 1.546[m] メジアン : 1.346[m] 誤差最大ケース : 6.040[m]

指数分布を仮定したモデルでの推定結果

推定誤差の平均 : 2.90[m] メジアン : 2.45[m] 誤差最大ケース : **8.83[m]**

正規分布を仮定したモデルでの推定結果 (パラメータ調整後)

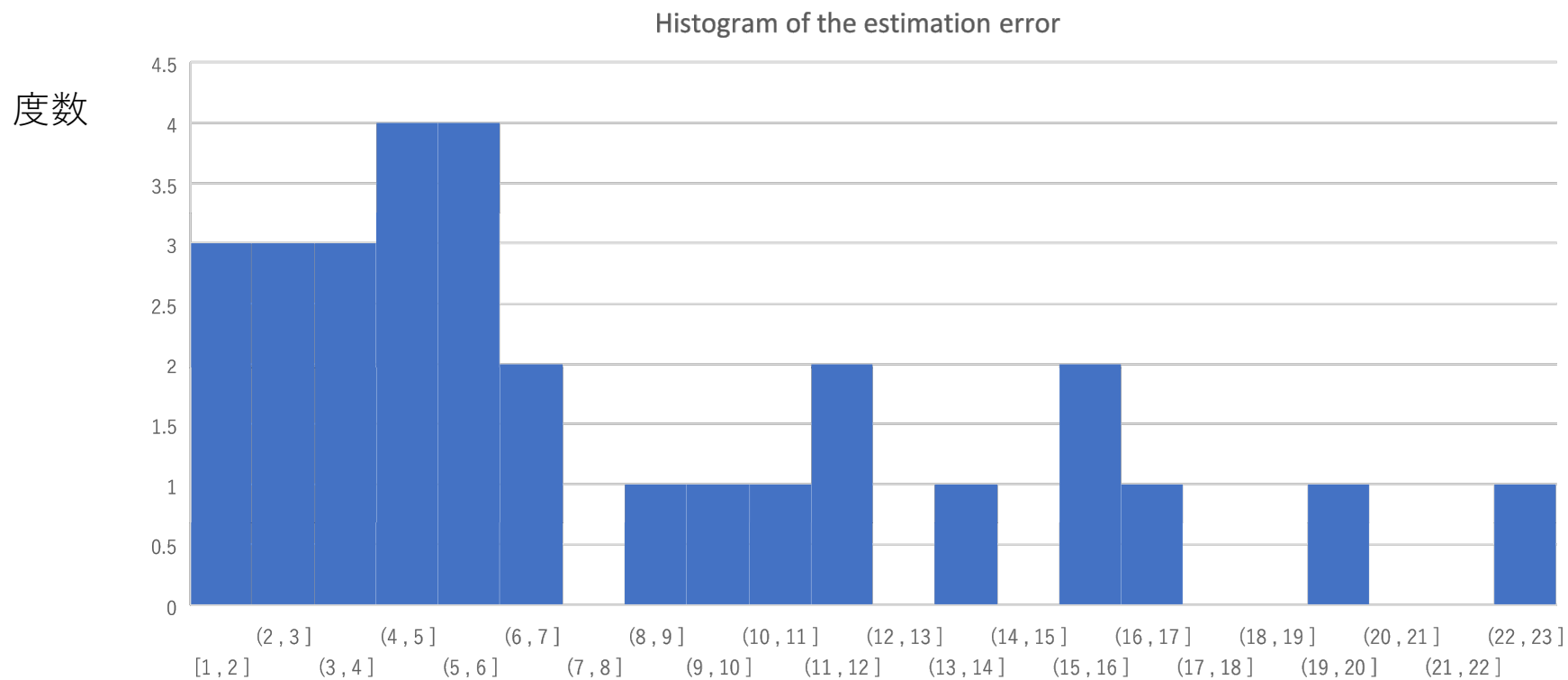
推定誤差の平均 : 2.31[m] メジアン : 1.71[m] 誤差最大ケース : 24.1[m]



ウエスト2号館2階の電波計測点とドローネー分割の様子
 計測点は64か所（下の図）
 これとは別に30ヶ所の電波観測を行い、推定精度を評価

フロア全体で218個のアクセスポイント観測
 計測点1か所あたり40~90のアクセスポイントを観測

実験 2 : 推定結果の評価



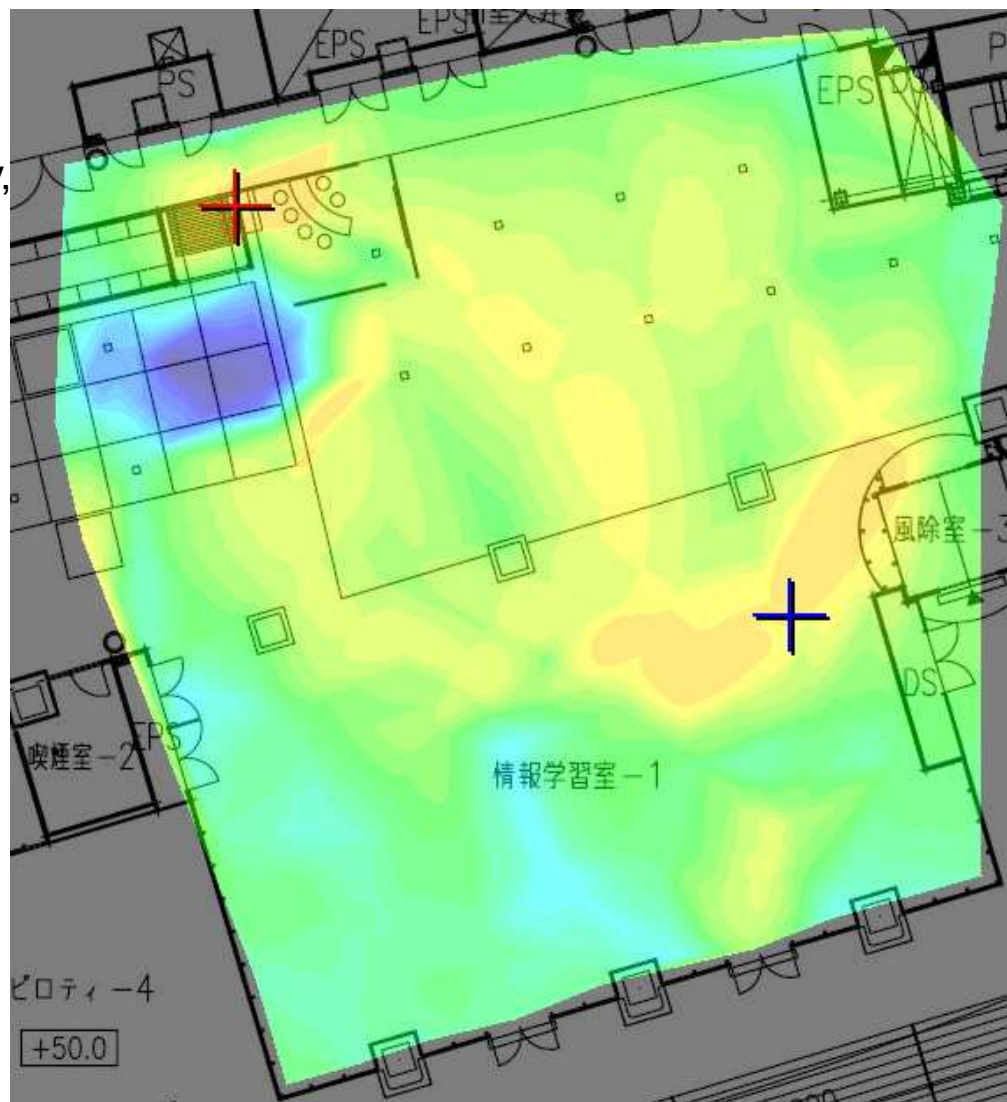
ワイブル分布を仮定したモデルでの推定結果

推定誤差の平均：7.248[m]

メジアン：5.088[m]

誤差最大ケース：22.73[m]

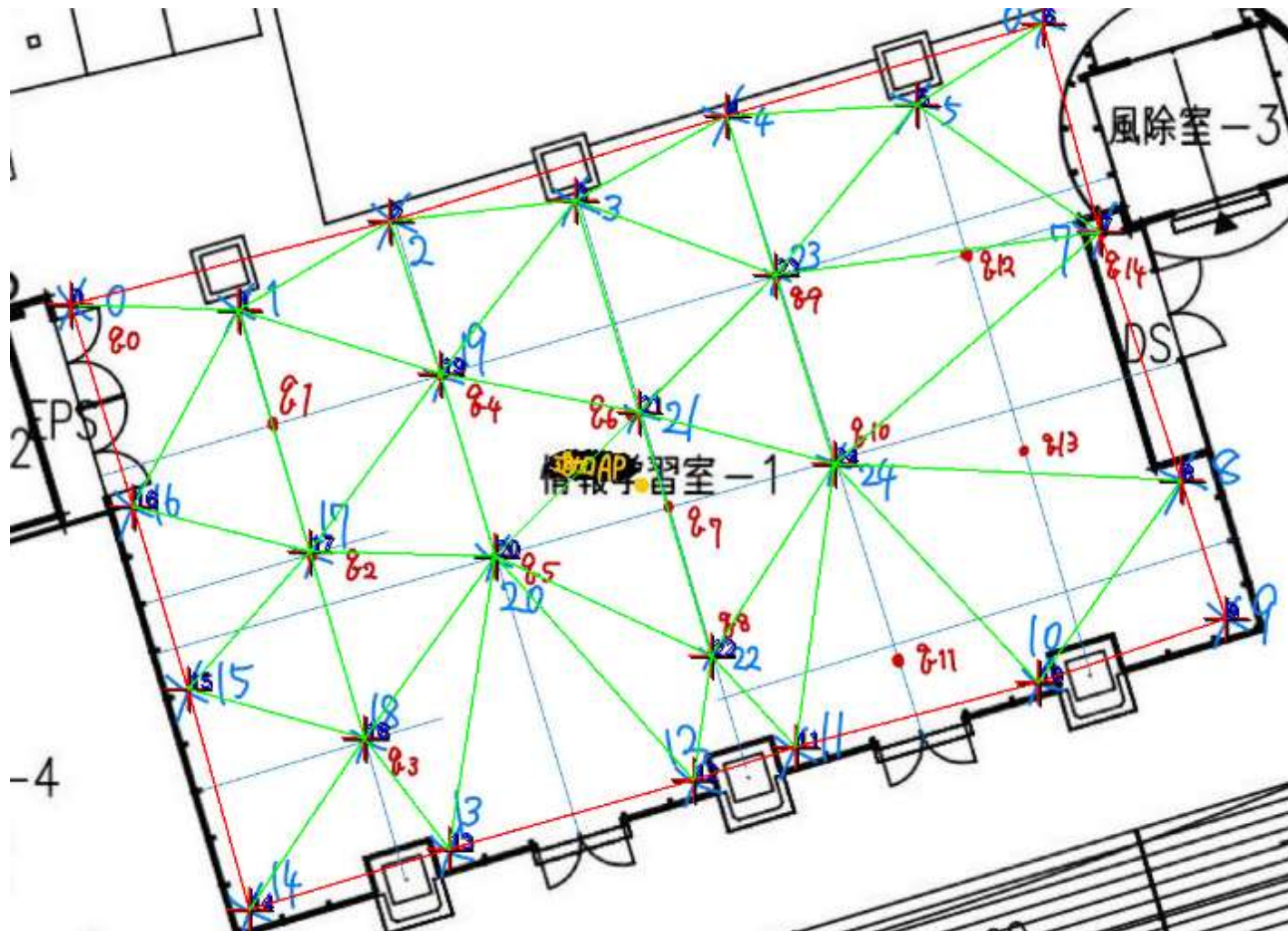
- Estimated position
 - True position
- The contour shows similarity,



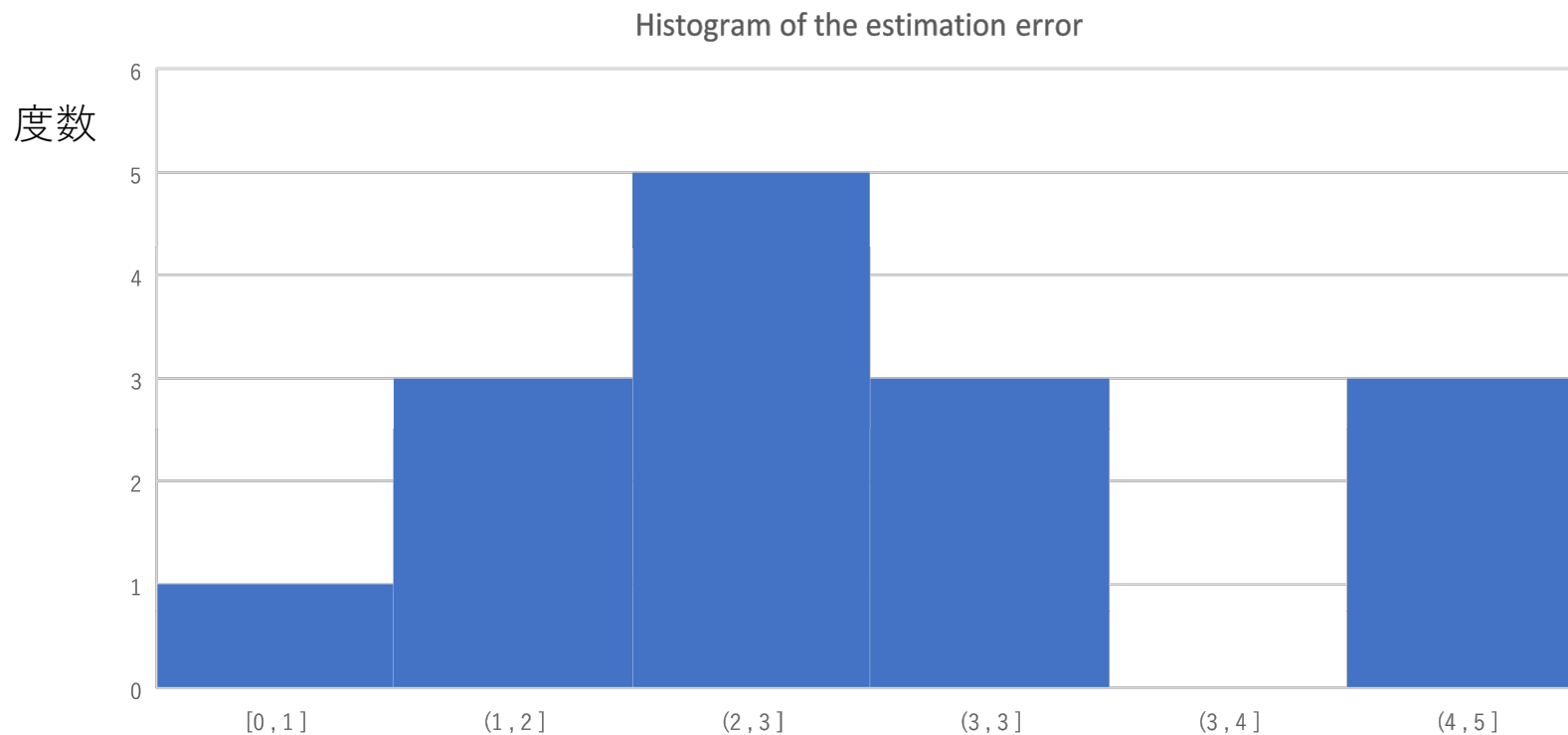
誤差最大ケース：22.73[m]

実験 3 - 1 : 対象領域の内部にアクセスポイントを1つ追加した開けたホール内

電波計測点とドローネー分割の様子
計測点は 25か所
これとは別に15ヶ所の電波観測を行い、
推定精度を評価



実験 3 - 1 : 推定結果の評価



ワイブル分布を仮定したモデルでの推定結果

推定誤差の平均 : 7.248[m]

メジアン : 5.088[m]

誤差最大ケース : 22.73[m]



AP追加後

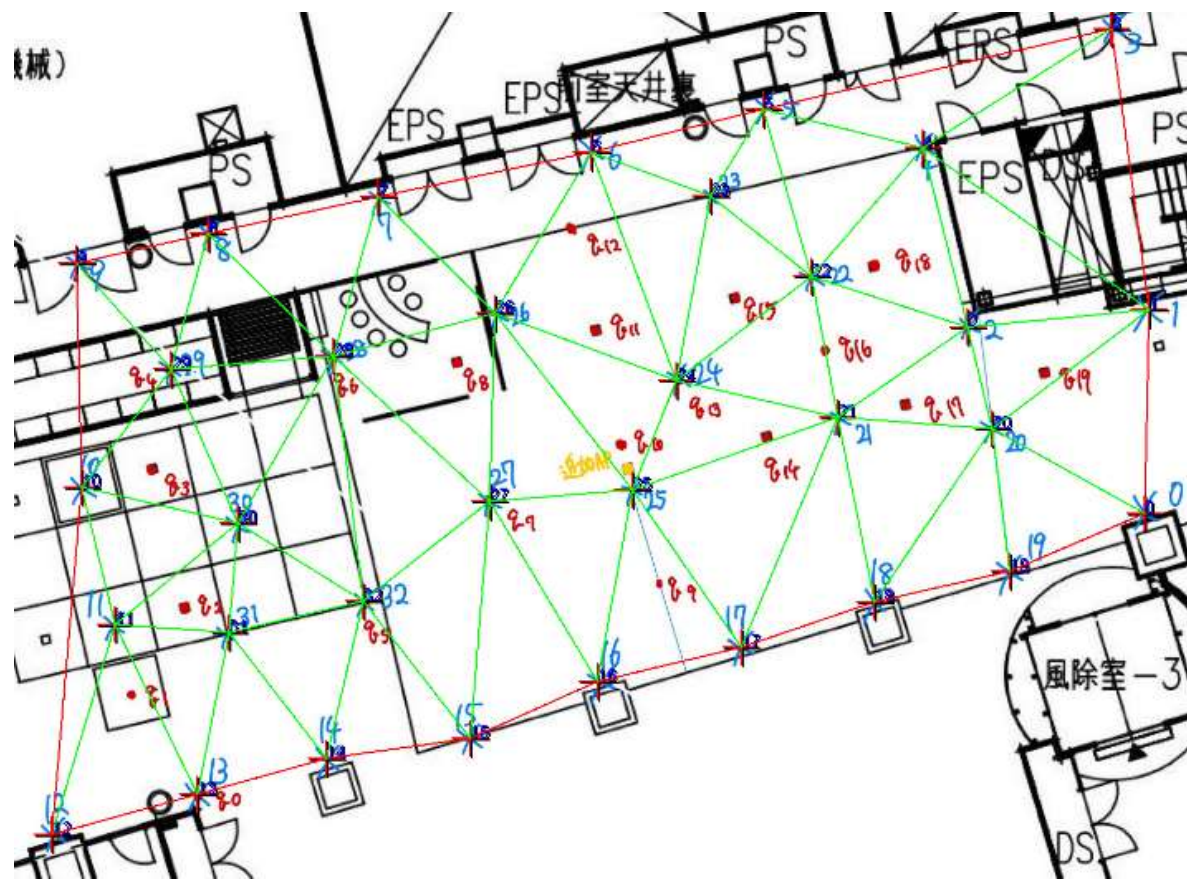
推定誤差の平均 : **2.546**[m]

メジアン : **2.323**[m]

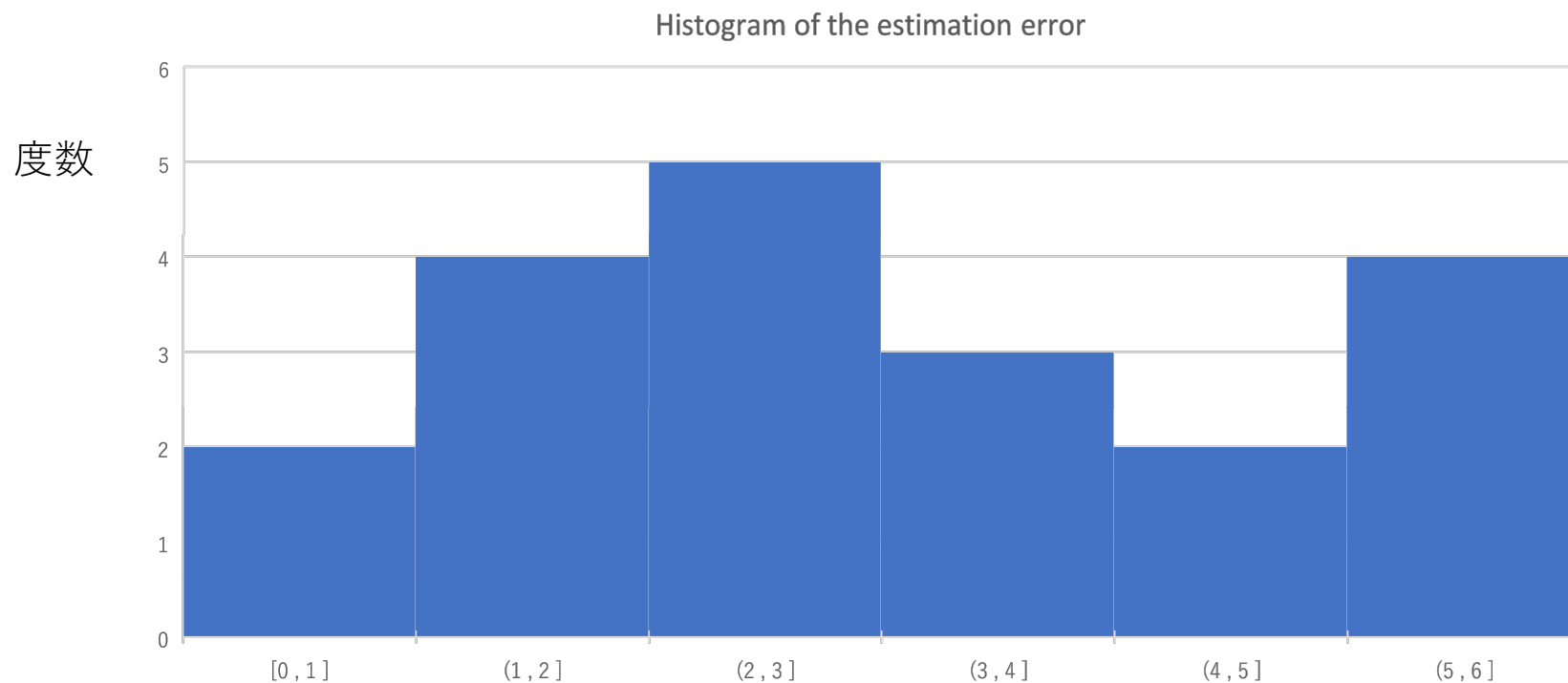
誤差最大ケース : **5.047**[m]

実験 3 - 2 : 対象領域の内部にアクセスポイントを1つ追加した開けたホール内

電波計測点とドローネー分割の様子
計測点は 33か所
これとは別に20ヶ所の電波観測を行い、
推定精度を評価



実験 3 - 2 : 推定結果の評価



ワイブル分布を仮定したモデルでの推定結果

推定誤差の平均 : 7.248[m]

メジアン : 5.088[m]

誤差最大ケース : 22.73[m]



AP追加後

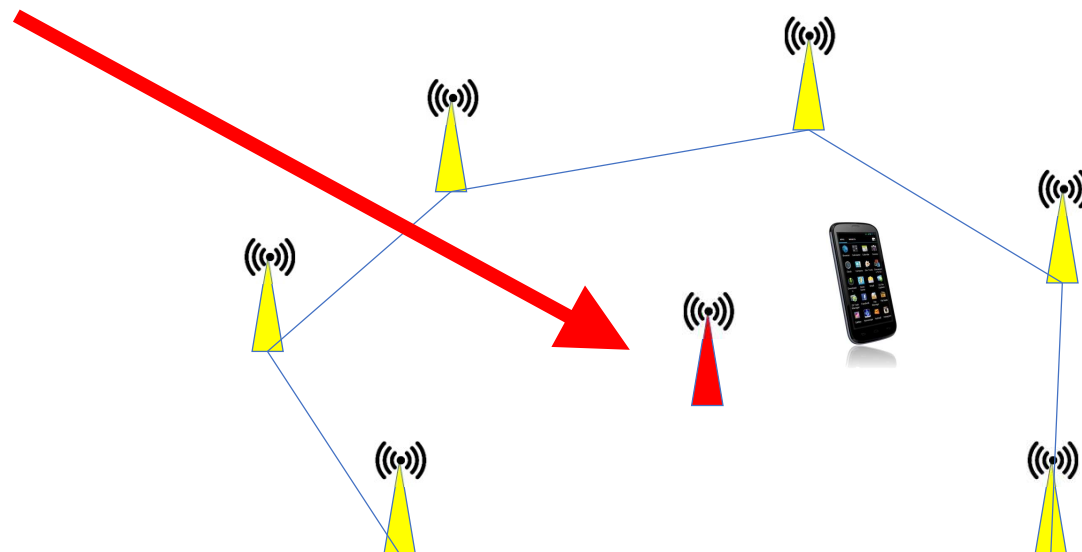
推定誤差の平均 : **3.326**[m]

メジアン : **2.976**[m]

誤差最大ケース : **6.162**[m]

考察 1

位置推定対象エリアの内部にアクセスポイントが無い場合、
内部に1つ追加するだけで劇的に推定精度が上がる



考察 2

多くのBSSIDの電波強度はあまり大きく変化しないが、
BSSIDによっては電波強度の標準偏差が平均値の5倍を超えるケースをたびたび観測

Wi-Fiルータの機種によっては、複数のアンテナの電波の位相をずらすことで特定方向との通信感度を上げる「ビームフォーミング」と呼ばれる機能を持つ場合がある。
この方向が頻繁に変化する場合、受信電波強度に大きなばらつきが予想される。
通信していない方向については電波強度が弱いまま一定と考えられる。
ハードウェア的なアンテナの取り付け方向によっても、
ビームフォーミングでも電波強度に差が出ない位置はある

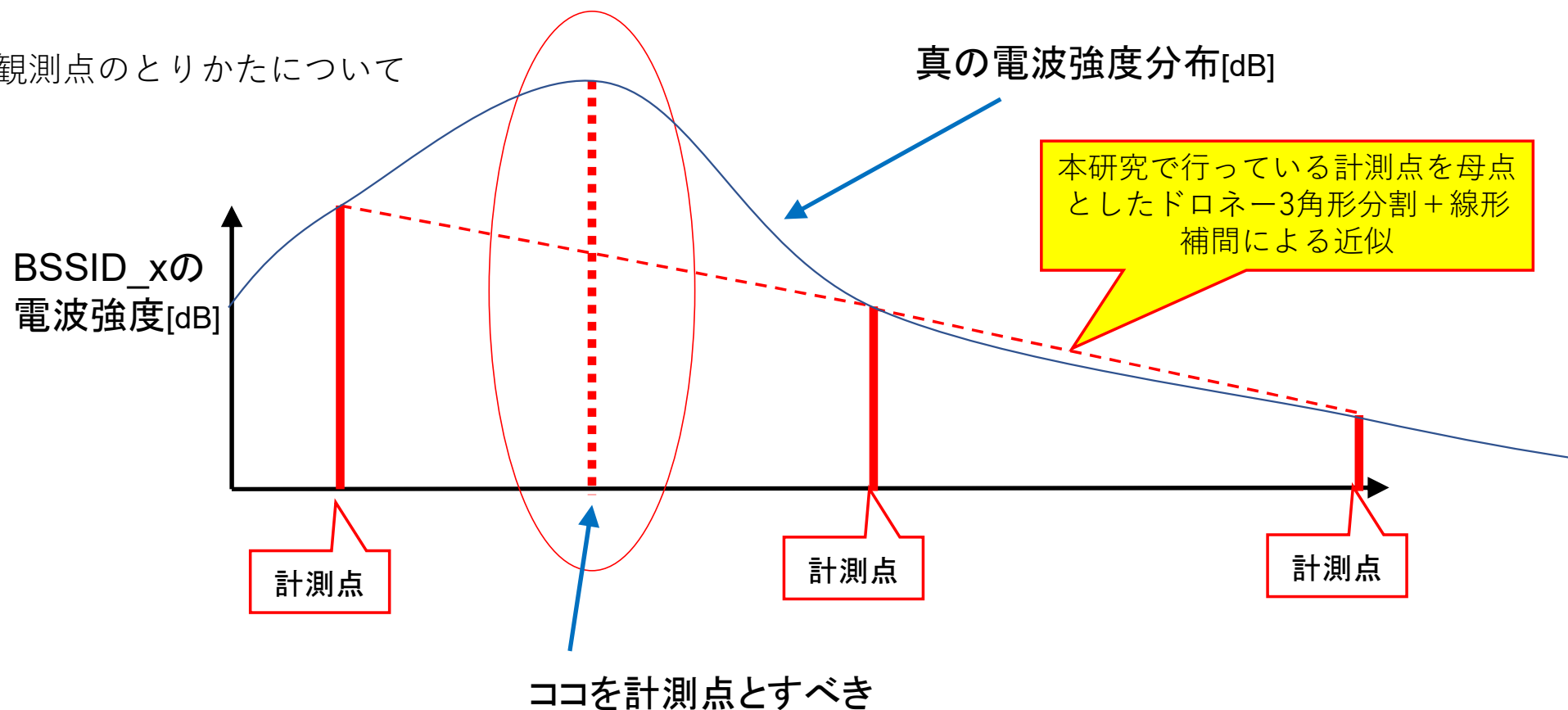
このようなアクセスポイントの受信電波強度の情報は、位置推定には向かないので、
受信強度の期待値だけでなく分散も考慮に入れる提案手法は合理的



考察

マップ作成用にデータ観測する際、推定精度に大きく影響する事項

電波強度の観測点のとりかたについて



おわりに

- 新しい設備投資無しで、既存の無線LANのインフラを利用した位置検出方法を提案
 - 1) 計測点毎に受信電波強度サンプル[mW]から**ワイブル分布**を最尤推定，期待値と分散[dBm]を計算
 - 2) 対象領域を計測点を母点として**ドローネー分割**、**期待値と分散[dBm]を線形補間したマップ**作製
 - 3) 位置推定対象の機器が受信した電波強度データの確率密度関数値の最大位置をマップ上で探索
- 検証実験より，推定対象領域内部におよそ十数メートル毎にWi-Fiアクセスポイントが存在し，観測点1つあたり50～80個程度のアクセスポイントが観測できる環境において約1.5から3.0[m]以下の精度で位置推定可能
- 推定対象領域内部にWi-Fiアクセスポイントが存在しない場合，推定精度は著しく悪化
領域中央にアクセスポイントを1つ追加するだけで推定誤差が半分以下に減少

フォークリフトのパレット置場
程度の精度で位置把握なら
実現可能

