

# 修士論文

ユーザ参加型無線LAN位置測定システム  
における測定精度の向上

**The improvement of the accuracy of  
user collaborative WiFi location systems**

2010年2月9日

指導教員 相田 仁 教授



東京大学大学院  
工学系研究科 電気系工学専攻

086515 藤木 慎太郎

# 内容梗概

---

近年、無線 LAN が企業や一般家庭、ましてや飲食店や地下鉄の駅にまでも普及しており、ラジオの電波のように簡単に無線 LAN の電波が拾える時代も遠くはないことを予感させる。また、携帯電話を持つのが当たり前という時代に至り、携帯ゲーム機なども携帯する人々が多い昨今、それらの端末のなかにさまざまなアプリケーションが搭載されて来ている。それらの中でも位置認識技術の必要性は、天気予報から子どもの防犯に至る例を見ても分かる通り、かなり高い。現在、携帯電話などで用いられている位置認識システムは GPS(Global Positioning System) を用いたものが大半を占めている。しかし、GPS を用いた位置測定では、屋内や地下鉄・地下街などの地下施設、ビルの陰などにおいて測定ができなくなるという難点がある。よって、これからは無線 LAN を始めとした無線通信技術をもちいた位置測定技術が注目されるようになるだろう。その技術をもってすれば、屋内や地下施設など、GPS では測定不可能な場所においても測定を可能にし、場合によっては GPS よりもかなり精度が高い位置測定を可能にする。

さて、その中でも本論文では、GPS のように手軽に測定が可能な無線 LAN による位置測定システムを考える。すなわち、無線 LAN ユーザが各自の端末が受信している電波の情報を提供し合って、位置測定モデルを確立させようとするものである。そのようなアプリケーションは現在需要が高まっているが、精度が平均して 10m より劣っているのが現状である。そこで本論文において、そのユーザ参加型位置測定システムの精度を向上すべく 2 つの手法を提案する。1 つは AP ごとに電波の減衰係数を導入する手法。他方は電波の確率密度関数を正規分布と仮定し検定を行って、移設された AP、もしくは間違えて登録された AP を排除する手法である。そして、それらの手法の有効性を確かめるべく、異なる環境下に置かれたいくつかの AP に対して実験を行った。

# 目次

---

第1章	序論	1
1.1	はじめに	2
1.2	本論文の構成	3
第2章	研究の背景	4
2.1	さまざまな位置測定システム	5
2.1.1	GPS	5
2.1.2	無線LANによる位置測定システム	6
2.1.3	その他の媒体を用いた高精度位置測定システム	8
2.2	ユーザ参加型位置測定システム	10
2.2.1	無線LANを用いたユーザ参加型位置測定システムの特長	10
2.2.2	他のシステムとの比較	11
2.2.3	ユーザ参加型位置測定システムの問題点	11
2.2.4	現状の対策と改善手法	12
第3章	ユーザ参加型位置測定システムの精度改善手法の提案	15
3.1	提案手法の概要	16
3.2	環境依存減衰係数 $\alpha$ の導入	16
3.3	閾値を用いたAP移設に対する対処法	16
第4章	実験方法	19
4.1	様々な環境に置かれたAPによる実測定	20
4.2	評価方法	20
4.2.1	減衰係数の値の決定手法	21
4.2.2	確率分布を用いたAP移設の対処法	22
第5章	実験結果と考察	23
5.1	距離に対する電波強度の値のプロット	24
5.1.1	横軸を $r$ とするか $\log r$ とするか	24
5.1.2	各APにおけるNotePCとProtablePCを用いた測定結果	31
5.2	確率分布図の作成	38
5.3	考察	39
5.3.1	APごとの距離と電波強度の関係性についての考察	39

---

5.3.2	確率分布の作成と閾値についての考察 . . . . .	39
<b>第6章</b>	<b>まとめと今後の課題</b>	<b>40</b>
6.1	まとめ . . . . .	41
6.2	今後の課題 . . . . .	41
6.2.1	実装 . . . . .	41
6.2.2	APが疎な部分での精度向上 . . . . .	41
6.2.3	既存のアプリケーションとの比較 . . . . .	41
6.2.4	情報不足区域に対する措置 . . . . .	42
	参考文献	<b>44</b>
	発表文献	<b>46</b>

# 目次

---

2.1	Differential GPS の原理 . . . . .	6
2.2	Air Location の原理 . . . . .	8
2.3	UWB とその他の無線通信の使用帯域比較 . . . . .	9
2.4	ユーザ参加型位置測定システムのイメージ . . . . .	10
2.5	ユーザが端末の位置を指定してアップロードした時の AP 位置の修正法 (Place Engine) . . . . .	13
2.6	ユーザが見知らぬ場所で位置測定した時の AP 位置の修正法 (Place Engine) . . . . .	14
3.1	距離と電波強度の関係と確率分布 . . . . .	18
4.1	各 AP に対する電波強度測定方法 . . . . .	21
5.1	本章のグラフにおける R,b,a の値の説明 . . . . .	24
5.2	工学部 12 号館 307(研究室) に設置した AP における r-S 座標グラフと $\log_{10} r$ -S 座標グラフの比較 . . . . .	25
5.3	工学部 12 号館 309(会議室) に置かれた AP における r-S 座標グラフと $\log_{10} r$ -S 座標グラフの比較 . . . . .	26
5.4	工学部 2 号館 2F に置かれた AP(SSID:bld2-guest) における r-S 座標グラフと $\log_{10} r$ -S 座標グラフの比較 . . . . .	27
5.5	工学部 12 号館屋外に配置した AP(PCI MZK-W04N-XX) における S-r 座標グラフと $\log_{10} r$ -S 座標グラフの比較 . . . . .	28
5.6	工学部 12 号館屋外に配置した AP(Airmac Express Base Station No.A 1089) における S-r 座標グラフと $\log_{10} r$ -S 座標グラフの比較 . . . . .	29
5.7	文京区弥生坂に設置された AP(Livedoor-fon) における S-r 座標グラフと $\log_{10} r$ -S 座標グラフの比較 . . . . .	30
5.8	工学部 12 号館 307 研究室に設置した AP における距離と電波強度の関係 . . . . .	32
5.9	工学部 12 号館 309 ( 会議室 ) に置かれた AP における距離と電波強度の関係 . . . . .	33
5.10	工学部 2 号館 2F に置かれた AP(SSID:bld2-guest) における距離と電波強度の関係 . . . . .	34
5.11	工学部 12 号館屋外に配置した AP(PCI MZK-W04N-XX) における距離と電波強度の関係 . . . . .	35
5.12	工学部 12 号館屋外に配置した AP(Airmac Express Base Station No.A1089) における距離と電波強度の関係 . . . . .	36
5.13	文京区弥生坂に設置された AP(Livedoor-fon) における距離と電波強度の関係 . . . . .	37

---

5.14 工学部 12 号館屋外に設置した AP(PCI MZK-W04N-XX) における距離・電波強度・確率密度の関係 . . . . .	38
---	----

# 表目次

---

2.1 位置測定システムの媒体・原理別の比較 . . . . .	12
4.1 測定対象 AP の情報 . . . . .	20

# 第1章

---

## 序論



## 1.1 はじめに

近年、laptopPCやPDAに限らず、携帯電話や携帯ゲーム機にまで無線LANが搭載されるようになり、また同時に、無線LANのアクセスポイント(以下、AP)が爆発的に増加し、より多くの場所においてワイヤレスでインターネットに接続できる時代になってきた。

携帯電話を持つのが当たり前という時代に至り、携帯ゲーム機なども携帯する人々が多い昨今、それらの端末のなかにさまざまなアプリケーションが搭載されて来ている。中でも、位置認識技術を取り入れたアプリケーションに対する需要が多く、小・中学生に携帯電話を持たせる場合は通話機能と位置情報通知機能に限定すべきであるという意見が大半を占めているほどである。

現在、携帯電話などで用いられている位置認識システムはGPS(Global Positioning System)を用いたものが大半を占めている。しかし、GPSを用いた位置測定では、屋内や地下鉄・地下街などの地下施設、ビルの陰などにおいて測定ができなくなるという難点がある。よって、これからは無線LANを始めとした無線通信技術をもちいた位置測定技術が注目されるようになるだろう。その技術をもってすれば、屋内や地下施設など、GPSでは測定不可能な場所においても測定を可能にし、場合によってはGPSよりもかなり精度が高い位置測定を可能にする。

では、具体的に無線通信技術を用いてどのように測定するのかというと、一般的には2種類の測定方式がある。RSSI(Received Signal Strength Indicator)方式とTDOA(Time Difference of Arrival)方式である。RSSI方式には、測定前にcalibrationを行って測定環境を整えておく必要があるものと、そうでないものがあるが、calibrationを必要とするものは手間がかかり、一般ユーザへの普及には至らない。TDOA方式は設置費用が依然として高額であり、現実的ではない。TDOA方式は特に、媒体としてUWB(Ultra Wide Band)などを用いることにより、精度10cm程度の高精度を実現できるという研究結果も出ているが、費用・手間の両面で乗り越えるべき壁は高い。以上より、筆者は、事前測定を必要としない無線LANを用いたRSSI方式の位置測定に注目した。

それは、地図検索サイトなどと連動させて全国各地から利用者を募り、さまざまな場所に位置する利用者からその位置の「電測情報」を集め、データベース化することにおいてRSSI方式特有の事前測定の手間を省略しようというものである。ゆえに、現在の普及度や電波の伝播距離から考慮すると、無線LAN(IEEE.802.11 b/g/n)を用いるのが最も効率的であるといえよう。ここで電測情報とは、ユーザ、すなわち端末が受ける電波の発信源であるAPのMACアドレス、各APから発せられる電波の端末での受信強度、各APの推定位置、などである。

しかし、ここでもうひとつの壁に当たってしまう。精度の問題である。無線LANのAPの数が少ない地域では、1つあるいは2つといった少ないAPからの電波を用いて端末の位置を測定しなくてはならないためにどうしても精度が落ちてしまう。また、誤差1m程度の精度の高い位置測定を行うに足る数のAPが周りに存在したとしても、データベースにおけるそれらの電測情報が間違っていたら正確に位置測定を行うことができない。具体的には、ユーザが地図上の自分の位置を本来の自分の位置とはかけ離れた位置として設定

してデータベースに登録してしまった場合や、APが消滅・移動した場合などである。その点に関し、ソニーコンピュータサイエンス研究所(現 Koozyt 株式会社)が開発した Place Engine[12]ではいくつかの対策を取っている。しかし、実際には、APが密集した都市部においても精度が10mより悪くなることがしばしばある。Place Engineは多くの地図検索サイトで採用されており、10万を超えるAP情報がデータベースに登録されているにも関わらずである。本研究では、その原因である、電波のマルチパス・フェージングの影響やAP移設問題を考慮にいれた考察を、位置測定の原理から掘り下げて進めていきたい。

## 1.2 本論文の構成

本論文は、6つの章から構成されている。以下に各章の構成を示す。

### 第1章

序論として、背景及び研究の動機、目的を説明し、本論文の構成について述べる。

### 第2章

現在利用あるいは研究されているさまざまな位置測定システムについて概説する。また、無線LAN位置測定システムの従来精度改善手法について述べる。

### 第3章

本論文で提案するユーザ参加型無線LAN位置測定システムの精度改善手法について、その詳細を述べる。

### 第4章

実験による測定方法及び評価方法について述べる。

### 第5章

実験の結果を示し、提案手法の有効性を検証する。

### 第6章

本論文のまとめを行い、今後の課題について述べる。

## 第2章

---

### 研究の背景

## 2.1 さまざまな位置測定システム

位置測定システムといっても、位置を測定するために用いる媒体が多種多様であるとともに、位置を測定する原理も多種多様である。ここではそのうちの代表的な位置測定システムをいくつか紹介していきたい。

### 2.1.1 GPS

まず最初に、近年の位置測定システムの基盤になっているといっても過言ではないのがGPS(Global Positioning System)である。これからいくつかの位置測定システムを紹介していくが、それらはGPSの原理を利用したり参考にしていて、しかもGPSの弱点を補ったものがほとんどである。よって、GPSを理解することが他の位置測定システムを理解することにつながるのである。

#### GPSの原理

GPSの原理を簡潔に述べると、上空に打ち上げられたいくつかのGPS衛星からの信号を、地上にあるGPS受信端末が受けるタイミングによってその位置を測定するというものである。すなわち、GPS衛星内とGPS受信機内にそれぞれ完全に同期している時計が搭載されているとすると、1つの衛星が信号を発した時刻と受信端末が信号を受信した時刻の差に電波の伝播速度( $3.0 \times 10^8 \text{m/s}$ :一定)をかけることによって受端端末の位置が1つの球面上のどこかに定められる。また、もう1つのGPS衛星からも信号を受けることによって、同じような原理で衛星-端末間の距離が定まり、受信端末はある1つの円上のどこかになる。さらに、もう1つの衛星からの距離が分かることによって受信端末の距離は1点に定まる(正確には2点が定まることが多いが、地球上にあるという条件を加えることにより、候補を1つに絞ることができる)。つまり、最低3つの衛星から信号を受信することにより受信端末の位置を推定することが可能となるのだ。

しかし、たとえ衛星と受信機の時計が $1\text{ns}(1 \times 10^{-9}\text{s})$ ずれているだけでも、光速( $3.0 \times 10^8 \text{m/s}$ )  $\times$  ( $1 \times 10^{-9}$ )s=0.3m程度のずれが生じてしまう。実際には、GPS衛星には精確な原子時計が搭載されているが、受信機には比較的精度に欠けるクォーツ等の時計が搭載されている。

さらに、GPS衛星と受信端末の間には、大気などの遮蔽物があることも考慮しなければならない。

それらを考慮に入れつつ、推定位置の精度を高めるためにはいくつかの方法があるが、まず第一の手段として、3つだけでなく4つ・5つとより多くのGPS衛星から信号を得ることにより、複数の推定位置候補を算出する方法がある。いくつかの候補を出すことにより、推定位置の信頼性や精度を高めることができるのである。

実際には、GPSは測位時に6~12個のGPS衛星と通信しているが、この手法を用いるだけでは、精度が10m程度となるのが現状である。

また、他の手段として、以下のような測位法を紹介する。

- 相対測位
  - Differential GPS(DGPS) と呼ばれるものの測位法。GPS 衛星と移動端末の間の電波の  
交信だけではなく、位置の分かっている基地局でも GPS 電波を受信して、誤差を補  
正し、移動端末に補正情報を送信する (Fig. 2.1 参照)。この方式では、誤差は数 m  
程度に縮めることが可能である。
- RTK 測位
  - RTK(Real Time Kinematic) 測位法を用いた GPS が Real Time Kinematic GPS である。端  
末が、衛星とともに電子基準点からも電波を受信し、位相差を計測し、位置を検出  
する。電子基準点というのは国土地理院が地殻変動を監視するために常に GPS 電波  
を受信している観測点であり、日本に 1200 力所存在する。正確には、測定する範囲  
の既知の位置に参照基準点を設け、そこが電子基準点から電波を受信し、端末に補  
正情報を送る。この方式では、測位計算に 1 分程度時間を要するが、誤差を数 cm 程  
度に収めることができる。

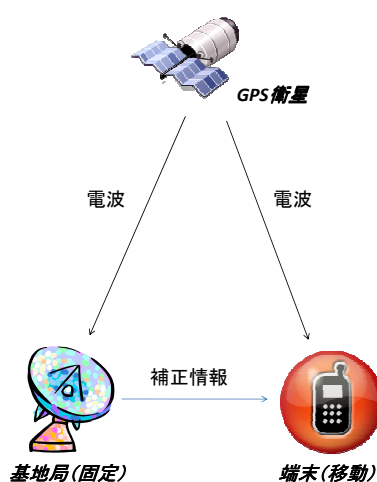


Fig. 2.1: Differential GPS の原理

以上のように、GPS も工夫を重ねて費用と手間をかければ、精度を高めることが可能である。しかし、それは空が開けた屋外においてという条件があり、屋内や地下施設・ビル街などでは GPS 衛星からの信号を受信することができずに測定が不可能であることが GPS の最大の弱点である。

### 2.1.2 無線 LAN による位置測定システム

そこで、GPS の弱点である屋内や地下施設などでも位置測定を可能にするために考え出されたのが、無線 LAN を媒体とした位置測定システムである。近年、都市圏を中心に企業や大学、カフェ、駅構内や車両、さらには一般家庭にも無線 LAN の導入が進んできている。この社会情勢をうまく利用して、位置測定に応用しようという試みである。

駅構内やショッピングモールで無線LANを用いた位置測定を実現することができれば、人を誘導したり、迷子を防止したりとあらゆるニーズに応えることが可能となる。

倉庫や医療現場においては、物品や機材にタグ付けを行うことによって、物品管理を円滑に行うことができる。また、認知症患者などに取り付けることにより、介護の補助的な役割を担うこともできる。

では、どのように無線LANを用いて位置測定を行うのかということ、その原理として、GPSの原理を応用したTOA[Time of Arrival]方式(TDOA[Time Differential of Arrival]方式)や電波の強さから位置測定を行うRSSI[Received Signal Strength Indicator]方式などがある。それらについて以下で詳しく説明していきたい。

### TOA方式・TDOA方式

TOA[Time of Arrival]方式とはGPSの原理とほぼ等しく、アクセスポイント(以下、AP)と受信端末が同期している条件下で、受信端末がAPからの信号を受信するタイミングから位置を測定するという手段である。しかし、前節でも述べたとおり、APと受信端末内のそれぞれの時計を同期させるのは、端末の小型化・低消費電力化という点でかなりの難題であり、費用がかさんで実用的とは言えない。そこで注目されたのが、TDOA[Time Differential of Arrival]方式である。TDOA方式とは、端末から各基地局が信号を受ける時刻の差から端末の位置を推定する手法である。つまり、あらかじめ既知の位置に設置する基地局(レシーバ)間で同期がとれていれば、理論上測定可能となる。

TDOA方式を利用した代表的なアプリケーションとして、日立的AirLocation[4]などがあげられる。

AirLocationではns(ナノ秒)単位の同期の難しさを次の方法で簡素化している。つまり、1台の無線LAN基地局をマスタ、3台の無線LAN基地局をスレーブという形で配置し、それぞれの位置をあらかじめ正確に把握しておく。位置測定を行なう場合、マスタからスレーブおよび位置を測定したい無線LAN端末へ同期信号を送信する。次にスレーブは無線LAN端末から発信された同期信号を受信し、その時間差によって端末の位置を割り出す、という原理である(Fig. 2.2参照)。

しかし、無線LANを用いたTDOA方式の位置測定システムは、マルチパスや見通し外(Non-Line-of-Sight)伝搬の影響を受けやすいために、現状でも精度は1~3m程度にしか及んでいない。

### RSSI方式

RSSI[Received Signal Strength Indicator]方式とは、電波強度によって位置を測定する手法である。単に電波強度によると述べたが、その手法の中にも大きく分けての2つの方法がある。

1つは、APが発信する電波の実効値を初期条件として、電波強度と距離の関係を表す非線形関数を利用して、位置を求める方法である。他方は、あらかじめ測定を行う周辺で事前に感知されるすべてのAPからの電波強度情報を収集しておき(このことをcalibration

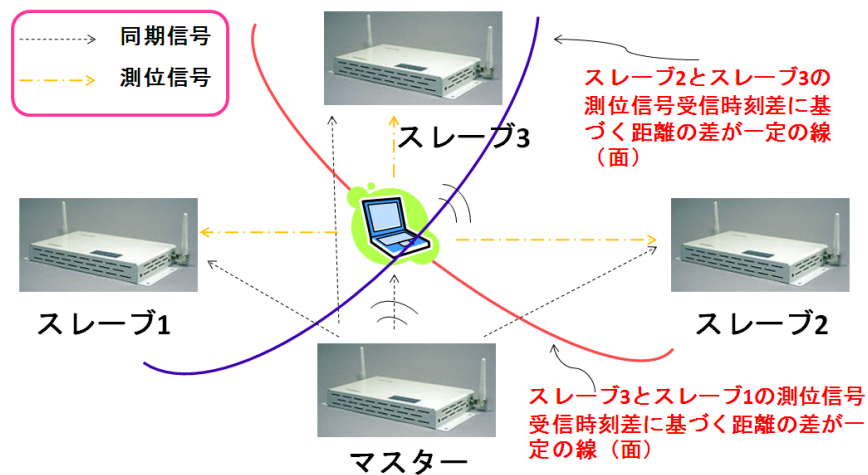


Fig. 2.2: Air Location の原理

と呼ぶ) 測定時にはその calibration の行ったポイントとどれだけ電波強度構成が類似しているかで位置を推定する方法である。

前者は、APごとの電波の実効値を把握することが難しい点、そもそも AP は干渉を避けるために自発的に電波強度の強弱を行っている点、電波強度と距離との関係が環境によって異なるために定式化しにくい点などの弱点がある。後で詳しく述べるが、この方法を用いた実例として、名古屋大学の河口らによる Locky.jp プロジェクト [11] や、Place Engine などがある。

一方、後者は、測定を行おうとするたびに calibration を行う必要があるという大きな難点を持つが、Microsoft 社の RADAR [1] や Ekahau 社の Ekahau [3] など、これまでに数多くのアプリケーションが実装されている。現在多くの医療現場や倉庫などで用いられている Ekahau Positioning Engine 4.6 での具体的な精度は、Calibration の間隔・回数にもよるが、 $1m^2$  につき 1 回行ったとしても、良くて 1m 程度である。

### 2.1.3 その他の媒体を用いた高精度位置測定システム

#### 超音波

1m 程度の精度では不十分であり、数十 cm あるいは数センチレベルの精度が必要な場面を想定して考えられたのが超音波を媒体として用いた位置測定である。超音波を用いるメリットとして、電波よりも伝搬速度が遅いため、TDOA 方式の測定において計測誤差や同期誤差が生じにくい点があげられる。逆にデメリットとしては、遮蔽物などにより音波が遮断されてしまう場合には測定が不可能になる点、超音波は減衰が激しく指向性を持つために 1~2m おきに超音波レーザを配置する必要がある点、レーザやトランスミッタ間で同期を行うのに無線 LAN 通信をどちらにせよ行う必要がある点、などが挙げられ、現実に普及するには克服する課題が多いことが分かる。

実際に超音波を媒体にした位置測定システムが実装された例として、Ward らの Active

Bat、Savvides らによる Iterative Multilateration、南らによる DOLPHIN[5][6] などがある。

### UWB(Ultra Wide Band)

マルチパスや見通し外伝搬の影響を受けにくい電波として超広帯域 (Ultra Wide Band) 無線技術があげられる。UWB とは、広義では、「500MHz 以上の帯域幅を使用する」または「中心周波数に対する帯域幅が 20 % 以上の」変調の有無にかかわらず近距離高速通信が可能な無線技術のことをいう。しかし、ここでいう UWB とは、変調をせずに 1ns 以下の数百 ps (ピコ秒) 程度の非常に短いインパルス状の純粋なパルス信号列を無線で送受信する通信方式 (UWB-IR[UWB-Impulse Radio]) を指す (Fig. 2.3 参照)。

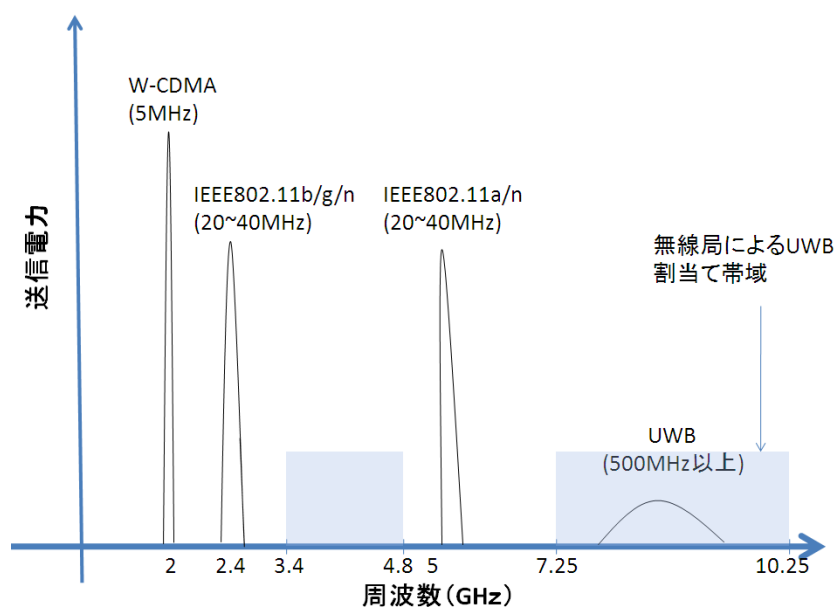


Fig. 2.3: UWB とその他の無線通信の使用帯域比較

よって、TDOA 方式によって幅 1ns のパルスを受信できれば、レシーバ内で受信時刻を  $\pm 500$ ps の精度で定めることが可能となり、これと速度  $c \doteq 3.0 \times 10^8$  m/s と距離の関係から、理論上 15cm の精度の位置推定を行うことができる。

また、UWB は広帯域に渡って重畳された電波を用いているために反射波の分離が比較的容易であり、無線 LAN において精度を悪化させる要因であったマルチパスの影響もそれほど受けることはない。

ただ、UWB を媒体として用いた位置測定システムの短所として、同期が必要なレシーバを含む基地局自体の費用が高いことや、設置の費用や設置のスペースの問題、さらには電波法による帯域使用の制限などがある [15]。

UWB を用いた実装例として、富士通と横浜国立大の共同研究によるもの [7][8] や日立の Air Sense UWB ロケーションシステムなどが挙げられる。



## 2.2 ユーザ参加型位置測定システム

前節においてさまざまな位置測定システムとその是非について述べてきたが、その中でも筆者が注目したのが無線LANを用いたユーザ参加型の位置測定システムである。

### 2.2.1 無線LANを用いたユーザ参加型位置測定システムの特長

マルチパスやフェージングの影響が大きいにもかかわらず無線LANに注目した理由はというと、その短所以上に我々の生活に無線LANが浸透してきているからである。

RSSI方式とTDOA方式では、RSSI方式の方がレシーバ等の基地局を設置する必要がなく、低予算でより広大な地域をカバーできるためにRSSIを採用する。

そして、calibrationをユーザに要求しては、現実的にユーザには大きな負担となりアプリケーションとして普及する見込みは得られないであろう。そう考え、本研究では、各ユーザが各場所での電測情報を管理者に送り、管理者がデータベース化して各ユーザにフィードバックすることでcalibrationを省略可能にしたユーザ参加型位置測定システムにスポットを当てる (Fig. 2.4 参照)。

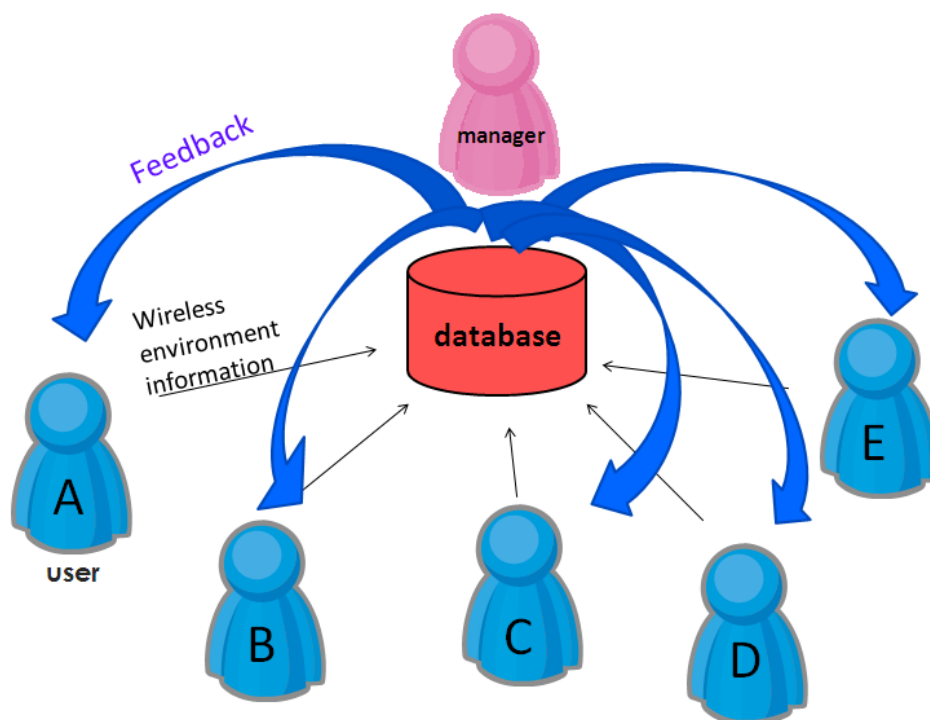


Fig. 2.4: ユーザ参加型位置測定システムのイメージ

ユーザ参加型位置測定システムの概要を説明しよう。まず、ユーザ参加型位置測定システムにおけるデータベースの具体的な要素は、

- 電測情報がユーザ (端末) から送られてきた時間

- 受信可能な周りの各 AP の MAC アドレス
- 各 AP から端末が受ける電波強度
- AP の推定位置
- ユーザが指定する端末の位置
- ユーザ ID
- 端末の機種

などである。これらの情報（ログ）を事前により多くのユーザから収集することにより、ある程度の精度が得られるシステムが構築できる。そこで、自分の位置を知りたいユーザは、端末で測定した電測情報とそのデータベースを照合し、「距離は電波強度の3~4乗に反比例する」という関係性を主たる手段として、ユーザの持つ端末の位置を推定する。以上が包括的なユーザ参加型位置測定システムの説明である。

locky.jp では、これらのデータベースの要素にコンテキスト情報も加え、APの置かれている場所に関連付けた情報をユーザへ提示できるようにしている。たとえば、東京大学工学系研究科の相田研究室において、位置情報を取得したときに、相田研究室のホームページが付加情報として得られるというものである。

また、locky.jp や Place Engine もそうであるが、Google マップや Mapion などの Web 上の地図検索サービスと連携して、より分かりやすい GUI アプリケーションを実現している。それにより、例えば、ユーザが初めて行く場所において位置情報を検索し、「コンビニエンスストア」や「ガソリンスタンド」などのキーワードを入力すると、そのキーワードに該当する周りの施設を地図上に表示してくれる、などの機能を容易に追加することが可能となる。

さらに、最近では GPS とのハイブリッド測位が主流になってきていて、AP 情報が疎な郊外地域の屋外でも安定して 10m 程度の精度が得られるようになってきている。ただし、以後、GPS では測定不可能な場面を想定し、無線 LAN での単独測位のみを考える。

## 2.2.2 他のシステムとの比較

ユーザ参加型の位置測定システムは他のシステムと比べると Table 2.1 のように表すことができる。ここで、精度に関して、“ ”が 1m 以内、“ ”が 1~3m、“ ”が 10m 程度、“ × ”が測定不可能を表すとする。また、超音波は屋外でも“ ”と評価したが、これは現段階では膨大なレシーバを必要とし、絶大な費用と手間がかかるために現実的とは言えない。また、UWB に関しては電波法で屋外での使用は認められていない。

## 2.2.3 ユーザ参加型位置測定システムの問題点

ユーザ参加型位置測定システムの問題点はというと、やはり精度の問題である。Locky.jp や Place Engine を用いても、AP の密集している地域でさえ、精度は良くて 10m 程度である。

精度を改善する（Table 2.1 において“ ”を“ ”にする）策として、ユーザを増やしてサンプル数を増やすことがまず考えられる。

Table 2.1: 位置測定システムの媒体・原理別の比較

		精度(屋外)	精度(屋内)	費用	手間
GPS			×		
無線 LAN	RSSI 方式 (calibration 有)				×
	RSSI 方式 (ユーザ参加型)				
	TDOA 方式			×	×
超音波 (TDOA 方式)				× ×	× ×
UWB(TDOA 方式)		×		× ×	× ×

しかし、ただ莫大な量の電測情報を収集しているだけでは、限界が見えてくる。というのも、アクセスポイントは常に変動・消失し得るからである。例えば、研究室の引っ越しで千葉県柏市から東京都文京区に引っ越してきたとして、無線 LAN アクセスポイントも移動させたとなると、研究室内でその無線 LAN によってインターネットに接続した状態で元のデータベースから現在位置を推定すると、千葉県柏市付近になってしまう恐れがある。アクセスポイントを移動させても、アクセスポイント自体の MAC アドレスは変わらないためにこのような事態が起きてしまうのである。また、悪意を持つユーザが誤情報を送る可能性もある。たとえば、東京都文京区で電測情報を測定したのに、それを千葉県柏市と偽って登録するような場合だ。

#### 2.2.4 現状の対策と改善手法

そこで、Locky.jp や Place Engine も独自の改善手法を提案している。

##### Locky.jp

Locky.jp で現在地の電測情報を送信するにはユーザ登録が必要であり、そのことによる程度は、悪意の持ったユーザが誤情報を送信してシステムが崩壊させられることを防いでいる。また、Locky.jp の情報提供の規約に「提供データには、可能な限り、長期的に利用可能な無線 LAN 位置局のデータが含まれるようにお願いします。イベント等の際に利用される短期的なデータについては、別の受付手法を取る」と書かれている。

##### PlaceEngine

PlaceEngine では次のようにしてアクセスポイントの移動や誤情報に対する対策を行っている。つまり、ユーザが電測情報を測定し、その時に現在地を明示してアップロードする際、その電測情報がアップロードされる前のあるアクセスポイントの推定位置を  $pos(AP_j)$  とし、アップロードされた後のアクセスポイントの推定位置を  $pos(AP_j)'$  とする。このとき、電波強度は距離の  $2(+ノイズ)$  乗に反比例することより、アクセスポイント ID (MAC アド

レス)と受信信号強度値から距離の制約条件を付けることができる。そして、もし、その距離の制約条件を満たさなかった場合は、その電測情報には信頼性があまりないとし、

$$pos(AP_j)^{new} = t \times pos(AP_j) + (1-t) \times pos(AP_j)' (0 \leq t \leq 1) \quad (2.1)$$

というようにして位置情報を更新する (Fig. 2.5)。ここで  $pos(AP_j)^{new}$  は制約条件を満たさないアクセスポイントの更新後の推定位置である。 $t$  は制約条件を満たさないアクセスポイントをどれほど度外視するかを決める係数であり、 $t$  が1に近いほど制約条件を満たさないアクセスポイントを度外視し、 $t$  が0に近いほどそれを信用するというものである。これは誤情報に関する対策であるように見えるが、アクセスポイントの移動に関する対策でもあるのである。というのも、もしアクセスポイントが移動したならば、その移動後のアクセスポイントの近くで誰かが電測情報の測定を行うと、そのアクセスポイントは距離の制約条件を満たしているはずであるから、移動後の位置がデータベースにそのまま登録されるはずである。

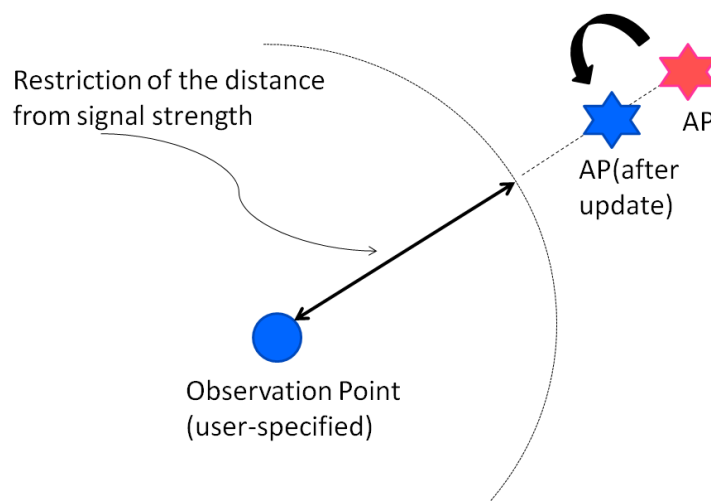


Fig. 2.5: ユーザが端末の位置を指定してアップロードした時の AP 位置の修正法 (Place Engine)

また、ユーザが見知らぬ場所で現在地を検索する場合でも、同じようなアクセスポイントの推定位置の更新が見込める。すなわち、ユーザが検索した時に、検索時のデータベース中のあるアクセスポイント同士の距離 ( $c$  とする) と、検索 (測定) 値から推定される現在地からその2つのアクセスポイントまでの距離 (それぞれ  $a, b$  とする) が求められる。これらの間に、

$$c < a + b \quad (2.2)$$

なる制約を設け、もしこの制約条件を満たさないならば、ユーザが位置を明示した場合と同じように Fig. 2.6 のような方針でデータベースのアクセスポイントの位置を更新する。

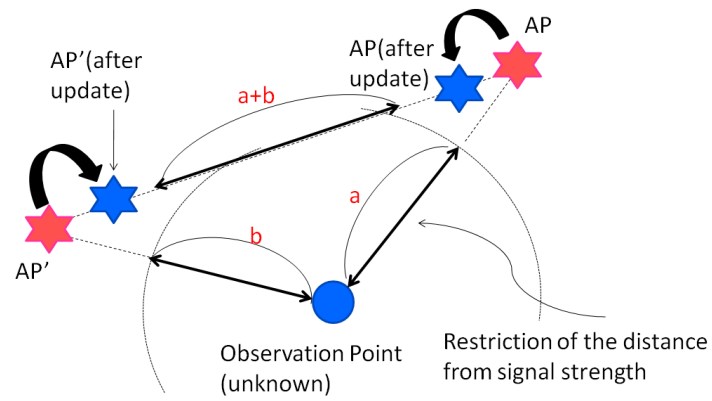


Fig. 2.6: ユーザが見知らぬ場所で位置測定した時の AP 位置の修正法 (Place Engine)

しかし、上記の対策をとっている PlaceEngine でさえ、現状は東京都文京区において位置を検索しても千葉県柏市と表示されてしまう問題が実際に起きてしまっているのである。その改善策について、本研究では議論していきたい。

## 第3章

---

# ユーザ参加型位置測定システムの 精度改善手法の提案

### 3.1 提案手法の概要

2.2.4節でも述べたとおり、APの移設・消滅を考慮したユーザ参加型位置測定システムは完全に構築されていない。Locky.jpではAPの消滅に対してはある程度の対策を取っているが、APの移設に対しての対策が現状なされていなく、Place Engineでは、一見構築されているように見えるが、APの移設に完全に対応するためには、データベースに登録されているAPの位置を何回も更新し続ける必要がある。

そこで本研究では、APの移設・消滅、誤情報に対してより敏感に対応し、より精度・信頼度の高い位置測定システムの実現を目的とする。

その実現のために、ここで2つの手法を提案したい。

1つは、精度向上のために、APが置かれている場所に依存する値 $\alpha$ を用い、無線LANの電波が特徴的に持つマルチパス・フェージングの影響を最大限に考慮したデータベースの構成を行う手法である。

もう1つは、APの移設・消滅、誤情報に完全に対応するために、APごとに電波強度と距離との関係から確率分布 $P$ を統計的に求め、その $P$ に閾値を設けることによって、移設・消滅、誤情報などの対象になるAPをデータベースから排除しようというものである。

本章では、これらの手法について詳しく説明していく。

### 3.2 環境依存減衰係数 $\alpha$ の導入

APからの距離 $[r]$ と電波強度 $[S]$ の関係は、真空中では $S$ は $r$ の2乗に反比例する。しかし、実際の環境においてはマルチパスやフェージングの影響があるために、 $S$ は $r$ の $(2+\alpha)$ 乗 $[\alpha > 0]$ に反比例すると近似できる。この減衰係数 $\alpha$ の値はAPの周りの反射物などの環境によって変わってくる(実際には天候や気候によっても若干変化するが本稿では考慮しない)。よって、各APごとに独自の $\alpha$ の値を設定してデータベースに登録すれば、より正確な位置測定ができるはずである。

すなわち、データベースに登録する要素を

- APを特定するMacアドレス
- そのAPの位置
- そのAPが発する電波強度の実効値
- そのAPに関する $\alpha$ の値

とすれば、マルチパス・フェージングを最大限に考慮することができる。 $\alpha$ の値はいくつかの場所で電測情報を集めることにより、実験的に決定される。

### 3.3 閾値を用いたAP移設に対する対処法

3.2節で述べた各APの要素を含んだデータベースを用いて位置測定を行う。3次元で位置測定を行うとして、端末の周りに観測可能なAPが4個以上あると仮定する。ここで、

前節の $\alpha$ は、APの指向性や障害物などにより変動するので新たな条件を加えることを考える。

そこで、減衰関数が $\alpha$ であるアクセスポイント $AP_i(i=1,2,\dots,n)$ から距離 $[r]$ のところで電波強度が $S_i$ である確率分布 $P_i(\alpha, r, S_i)$ を統計的に求める。位置がデータベースより既知である $AP_i(i=1,2,\dots,n)$ からの電波強度 (Fig. 参照) が電測結果と一致する確率は

$$P_1 \times P_2 \times \dots \times P_n = \prod_{k=1}^n P_k(\alpha, r, S_k) \quad (3.1)$$

であり、これを最大にするような位置をもって端末位置を推定している (Fig. 3.1 参照)。このとき、 $P_i$ に閾値を設けて、その値より小さくなる場合にはそのAPは移設されている可能性が高いとしてAP情報をデータベースから削除し、残りのAPを用いて測定を行うことにすれば、精度が高まる。具体的には、確率分布 $P_i(\alpha, r, S_i)$ が正規分布に従うとして、統計学でいうt検定の中の両側検定、つまり有意水準 $(x)$ とすると、それに対応する $P$ を閾値をして採択・棄却を行う。

ただし、この条件を満たすAPが3個未満になる場合は有意水準 $x$ の値を大きくして、条件を緩める。

以上が、本研究のAP移設に対する対処法である。

PlaceEngineの手法と異なる点は、各APに独自の $\alpha$ の値を設定して最大限にマルチパス・フェージングの影響を考慮している点、そして、制約条件を満たさないAPのデータベースでの位置情報を徐々に修正していくのではなく、完全に排除する点にある。



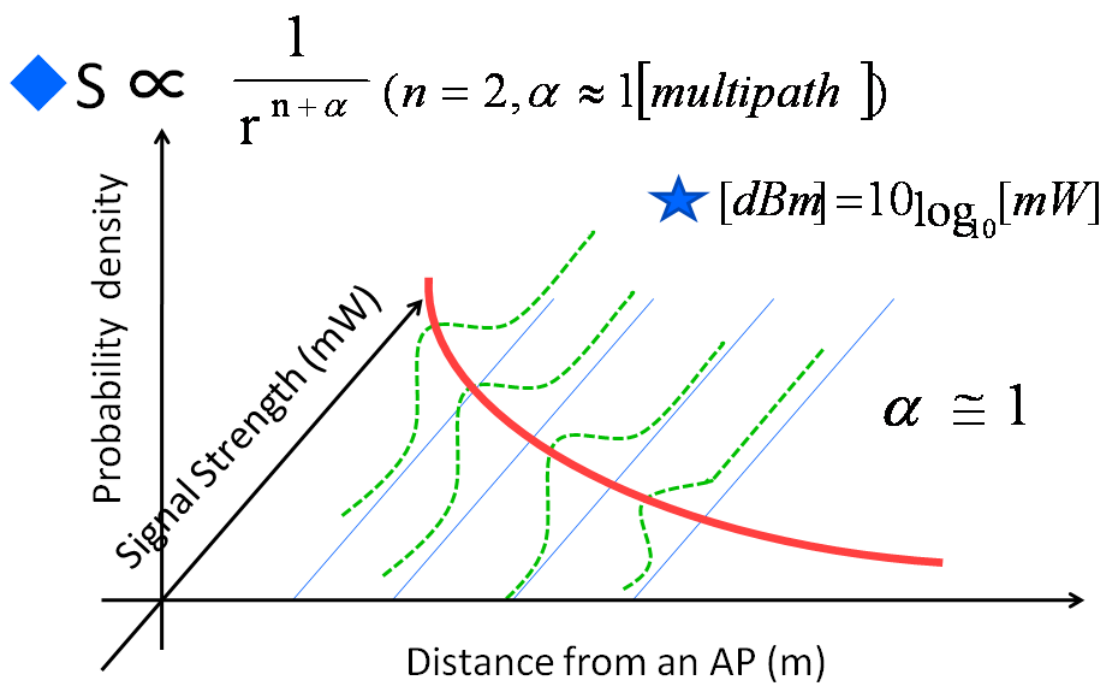


Fig. 3.1: 距離と電波強度の関係と確率分布

## 第4章

---

## 実験方法

## 4.1 様々な環境に置かれたAPによる実測定

本研究では、提案手法の有効性を検証するため、まずは様々なアクセスポイントに関して個別に電波強度を一定間隔ごとに測定してプロットし、実環境における電波強度と距離の関係性について実験を行った。

測定用端末としては、電波強度や測定位置を確認しながら測定する必要があるためにNotePC Dell vostro1200を用いて行い、また、端末間の受信感度の違いを確認する目的で小型PCであるSONY VAIO VG N-UX91NSを用いても測定を行った。

APからの正確な距離を測定するために、レーザー距離計 Leica DISTO A6を用いた。

電波強度測定用アプリケーションとしては、Ekahau Site Survey 4.6 Professional versionを用い、約1秒間隔でAPごとのリアルタイムな電波強度の値を得られる環境を整えた。

測定対象であるAPには、互いにマルチパス・フェージングの影響が異なるであろうAPをできるだけ選ぶようにした。

具体的なAPの位置、スペックに関してはTable 4.1にまとめてある。場所の詳細などは5章で述べるが、基本的には東京大学浅野キャンパス周辺で行った。

測定方法としては、各APに対し、APと測定者の間に端末が来るように測定者が持ち、1m間隔ごとにAPから後ずさる形をとった。(Fig. 4.1)また、APから様々な角度に向かって距離を取り、APからの1m間隔ごとに合計で15回測定をして、距離と電波強度の関係のグラフにその結果をプロットした。

Table 4.1: 測定対象 AP の情報

	場所	AP 製品情報
AP1	工学部 12号館 307(研究室)	Buffalo Air Station WZR-HP-G300NH
AP2	工学部 12号館 309(会議室)	Air Station WHR-HP-AMPCT
AP3	工学部 2号館 2F	SSID:bld2-guest
AP4	工学部 12号館屋外	PCI MZK-W04N-XX
AP5	工学部 12号館屋外	AirMac Express Base Station No.A1089
AP6	文京区 弥生弥生坂	Livedoor-fon

## 4.2 評価方法

本研究の目的は、特にAP密集地帯において、既存のユーザ参加型位置測定システムよりも精度を上げるシステムを実現することである。そのためには、第3章において述べた2つの手法が必要であることを述べた。そこで、本節では、まず減衰係数の値の決定方法についての概要を述べ、次に確率分布を用いたAP移設の対処法について述べていく。

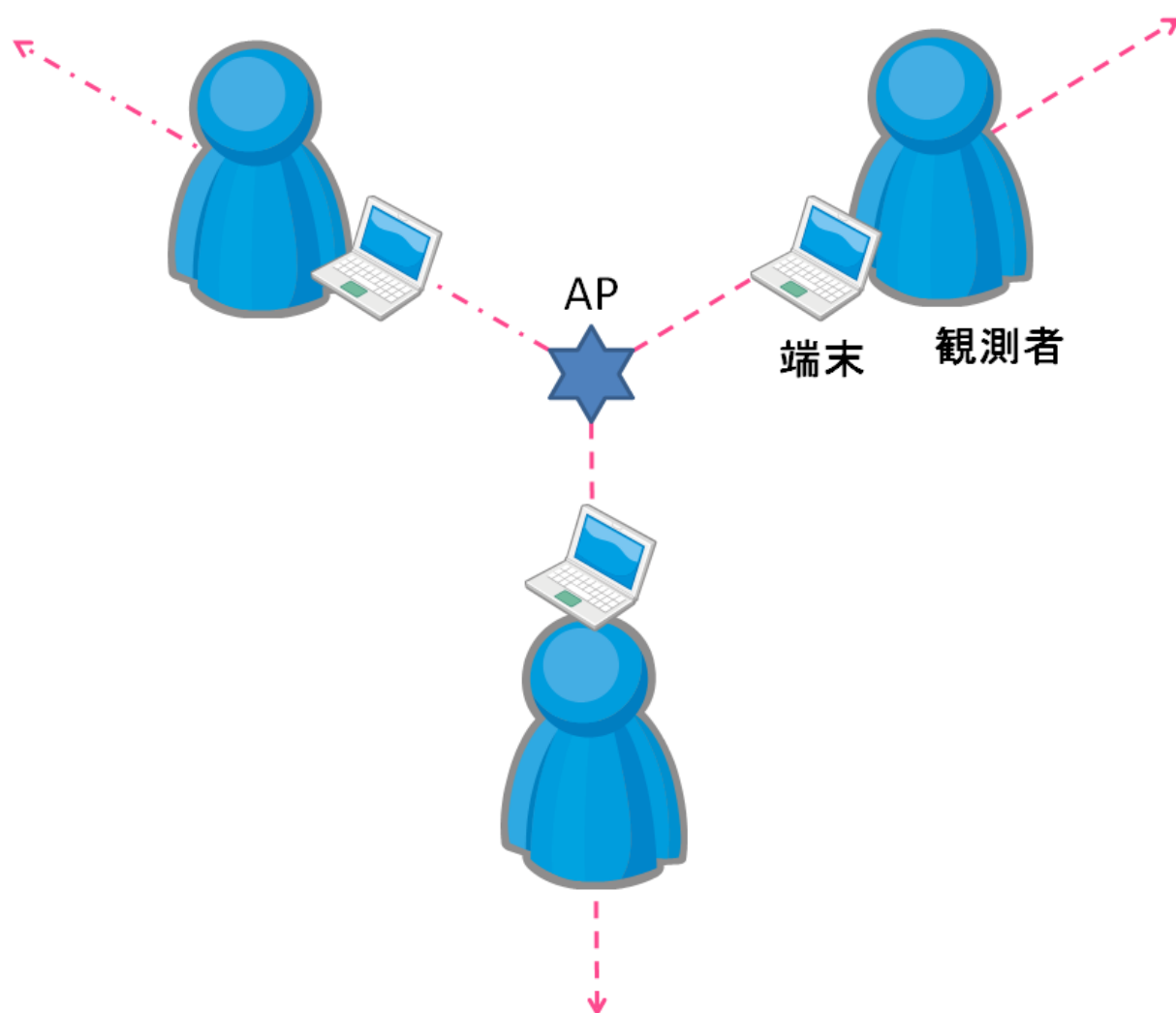


Fig. 4.1: 各 AP に対する電波強度測定方法

#### 4.2.1 減衰係数の値の決定手法

減衰係数の値の決定には最小二乗法を用いた回帰分析を用いる。第 4.1 節で述べたように、距離  $\log_{10} r[\text{m}]$  に対する電波強度の値  $S[\text{dBm}]$  を散布図に表して、回帰分析を行い、回帰直線

$$dBm = a - b(\log_{10} r) (b > 0) \quad (4.1)$$

を得る。

この回帰直線の相関係数の絶対値  $R$  が 1 に近い場合、その傾き  $b$  が“ どれだけ距離に対して電波が減衰していくか ”を表しているために、傾き  $b$  を減衰係数とみなせる。逆に  $R$  の値の絶対値が 0 に近い場合、距離と電波強度の間に相関が薄いことになるが、それで

も統一を画すため、その回帰直線の傾きを減衰係数とみなすことにする。ただし、 $R$ の値は、最終的に位置測定システムの精度に大きく影響してくると考えられるので、減衰係数 $b$ とともにデータベースにAP毎の要素の1つとして蓄えることにする。

ここで、(4.1)式において距離に対数をとっている理由はというと、自由空間において電波強度 $S'$ [mW]と距離 $r$ [m]の関係は

$$S' \propto 1/r^2 \quad (4.2)$$

であり、  
単位 mW と単位 dBm には

$$[dBm] = 10 \log_{10}[mW] \quad (4.3)$$

という関係があるため、式(4.2)と式(4.3)より

$$S \propto \log r (\because \log_{10} 1/r^2 = -2 \log_{10} r) \quad (4.4)$$

ということである。

この過程からもわかるように、第3章で述べている減衰係数 $\alpha$ と前述の $b$ との関係は

$$b = \alpha + 2 \quad (4.5)$$

である。

#### 4.2.2 確率分布を用いたAP移設の対処法

本研究の根幹をなす部分である位置測定システムの移設の対処法については、閾値をどの関数を用いていかに定めるかが重要になってくる。そこで、最も理論的であり、理解しやすい手法として、ある距離( $r$ )における電波強度 $S$ と確率密度 $P$ の関係から閾値を設ける手法を考えた。

つまり、距離と電波強度の関係を表した2次元平面の垂直方向に第3.3節で述べた確率密度 $P$ を導入し、 $r$ をある値に固定すると、 $S$ と $P$ の関係は正規分布をなしていると仮定することができる。

ここで $P$ に閾値である有意水準 $x$ を設け、その $x$ に対応する $P(P_{thr})$ 以下であるAPは移設したものであるとしてデータベースから情報を削除する。

以上の方針で実際に、Table 4.1の各APに対して $r$ 軸と $S$ 軸を含む平面上に確率密度をプロットしてみる。

## 第5章

---

### 実験結果と考察

## 5.1 距離に対する電波強度の値のプロット

第4章で述べた方法で、実験を行った。本章ではその測定結果を示していく。

### 5.1.1 横軸を $r$ とするか $\log r$ とするか

まずは、実験を重ねていく中で出た結論として、第4.2.1節での電波強度  $[S(\text{dBm})]$  は距離の対数を取ったもの  $[\log_{10} r]$  に比例する理論とは異なり、電波強度  $[S(\text{dBm})]$  は距離  $[r]$  に比例すると考えた方がより直線関係に当てはまっていることがわかった。つまり、Table 4.1にあるAPで実験を行って距離と電波強度の関係をグラフにし、その回帰直線の相関係数を計算したところ、ほぼすべてのAPにおいて横軸に  $[\log r]$  ・縦軸に  $[S]$  を取ったグラフよりも、横軸に  $[r]$  ・縦軸に  $[S]$  を取ったグラフの相関係数の値  $(R)$  のほうが大きかった。ただ、屋外では  $\log$  を取った方が相関が高いものもあるが、それでも  $\log$  を取らないものと大差はない。(Fig.5.2、Fig.5.3、Fig. 5.4、Fig. 5.5、Fig. 5.6、Fig. 5.7参照。ここで、上側のグラフが横軸に  $[r]$  を取ったもの、下側のグラフが横軸に  $[\log_{10} r]$  を取ったものである。)

よって、本実験では電波強度  $[S(\text{dBm})]$  と距離  $[r]$  の関係を利用することに統一した。

なお、本章でのグラフの上部に記した  $R, b, a$  の値の意味は、それぞれ、 $R$ :相関係数、 $b: (-1) \times [\text{回帰直線の傾き}]$ 、 $a$ :回帰直線の切片を表す (Fig. 5.1参照)。  $b, a$  の値の重要性は、位置測定システムにおいてそれぞれが意味するところが、減衰係数、APの出力、であることにある。

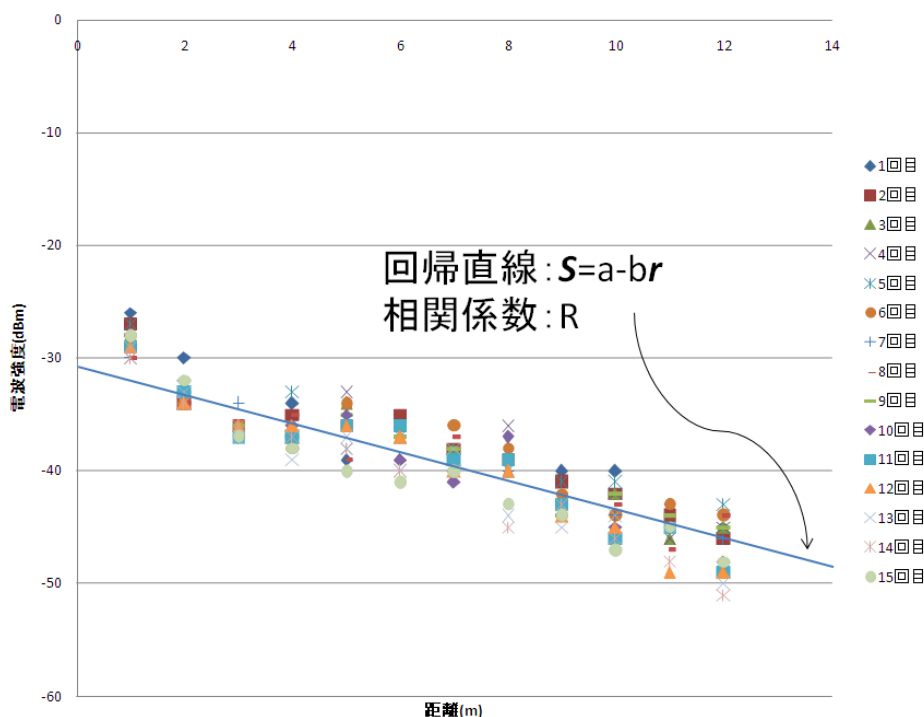
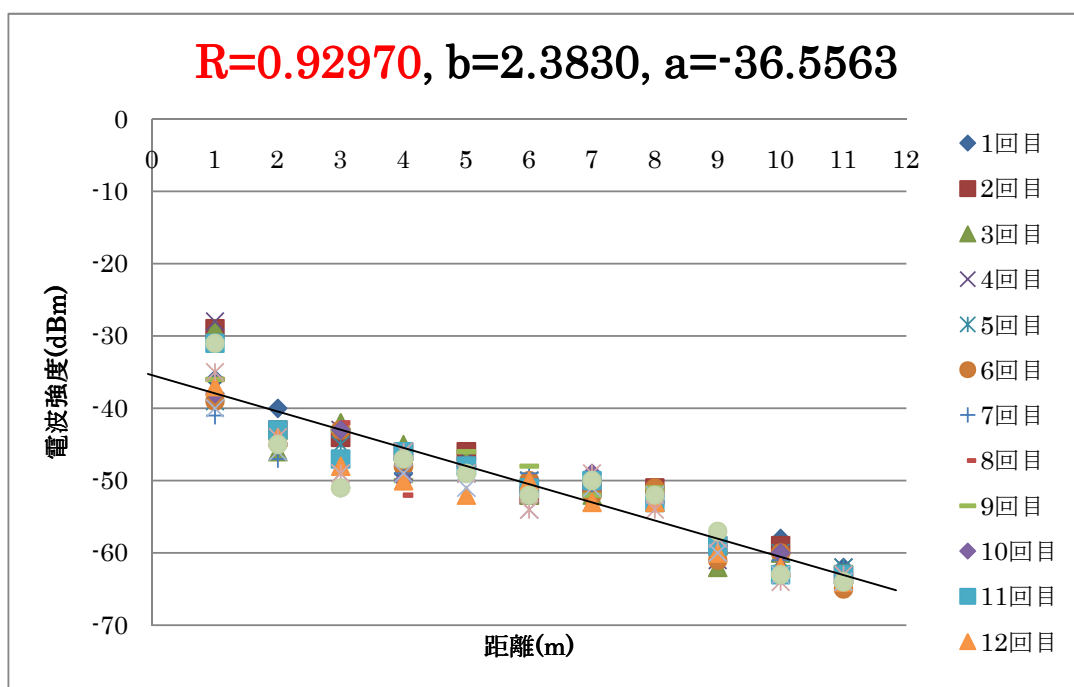
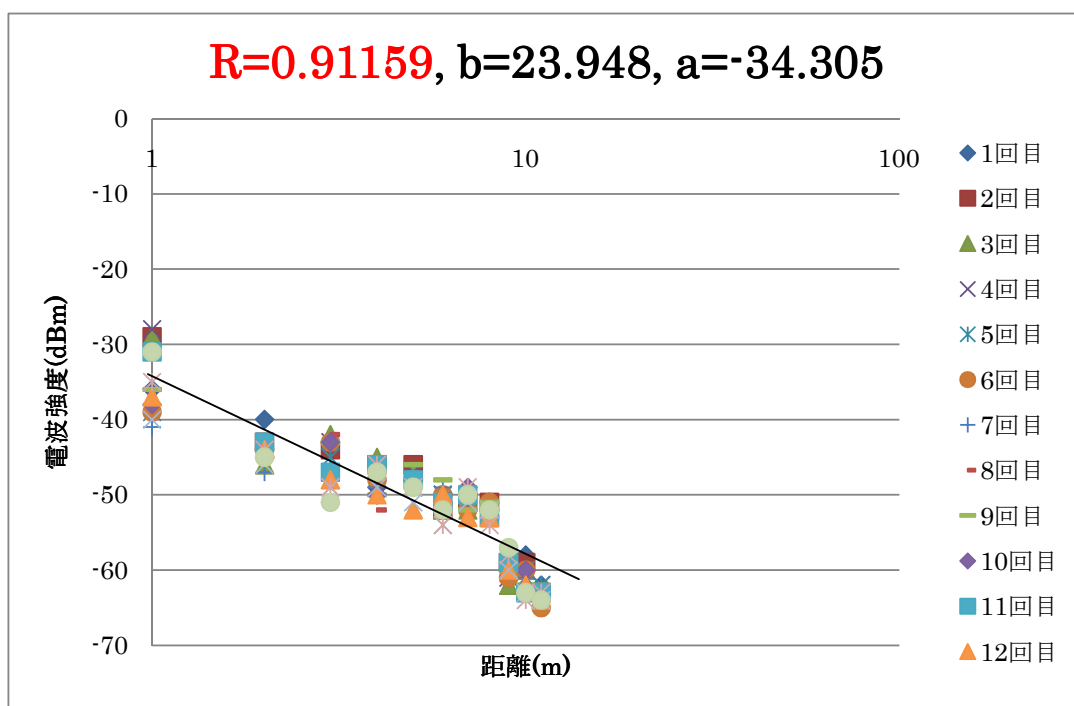


Fig. 5.1: 本章のグラフにおける  $R, b, a$  の値の説明



(a)r-S 座標グラフ



(b)( $\log_{10} r$ )-S 座標グラフ

Fig. 5.2: 工学部 12 号館 307(研究室) に設置した AP における r-S 座標グラフと  $\log_{10} r$ -S 座標グラフの比較



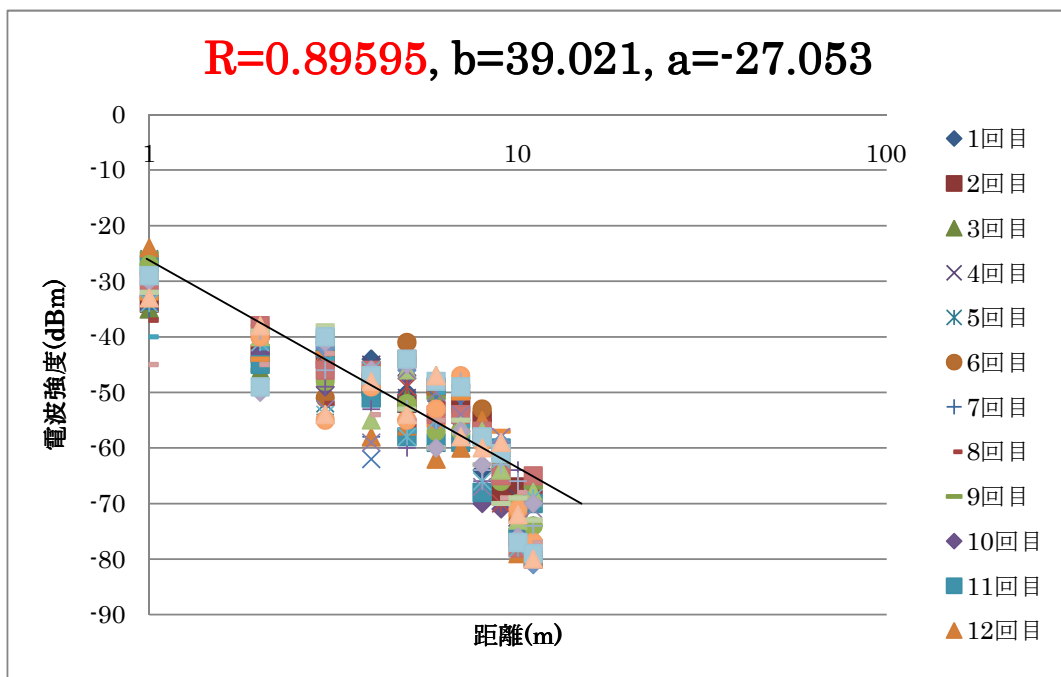
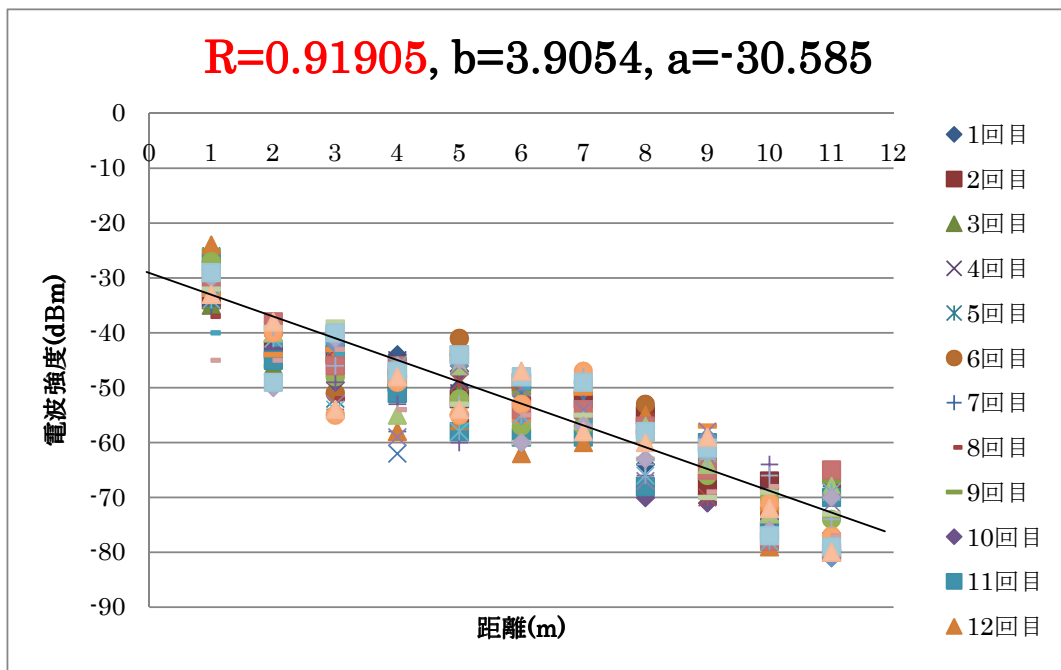
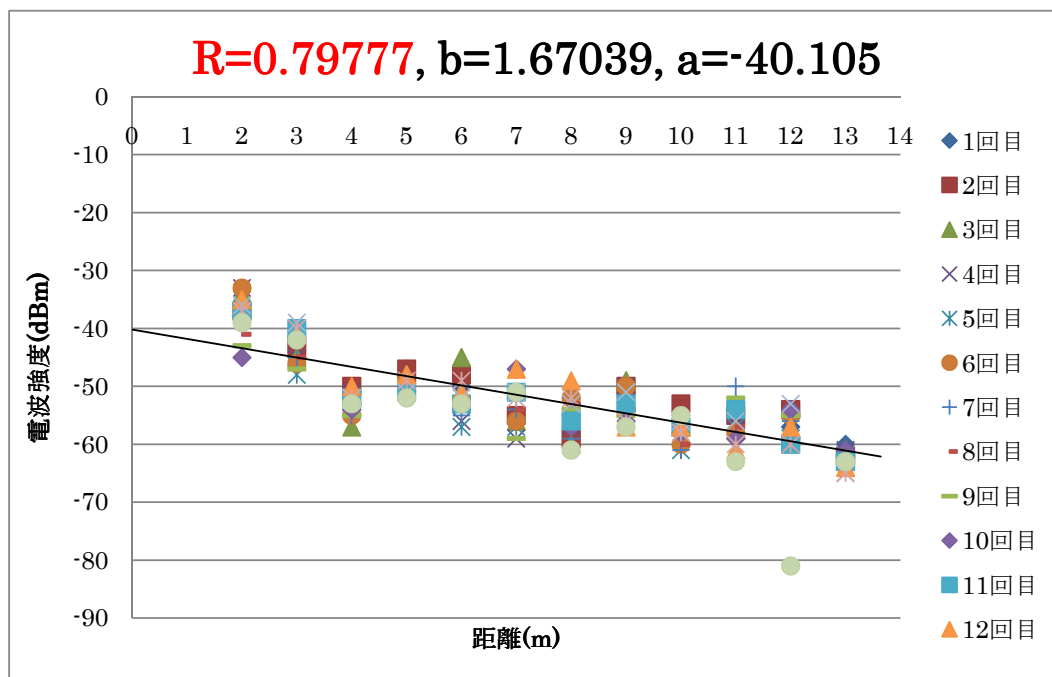
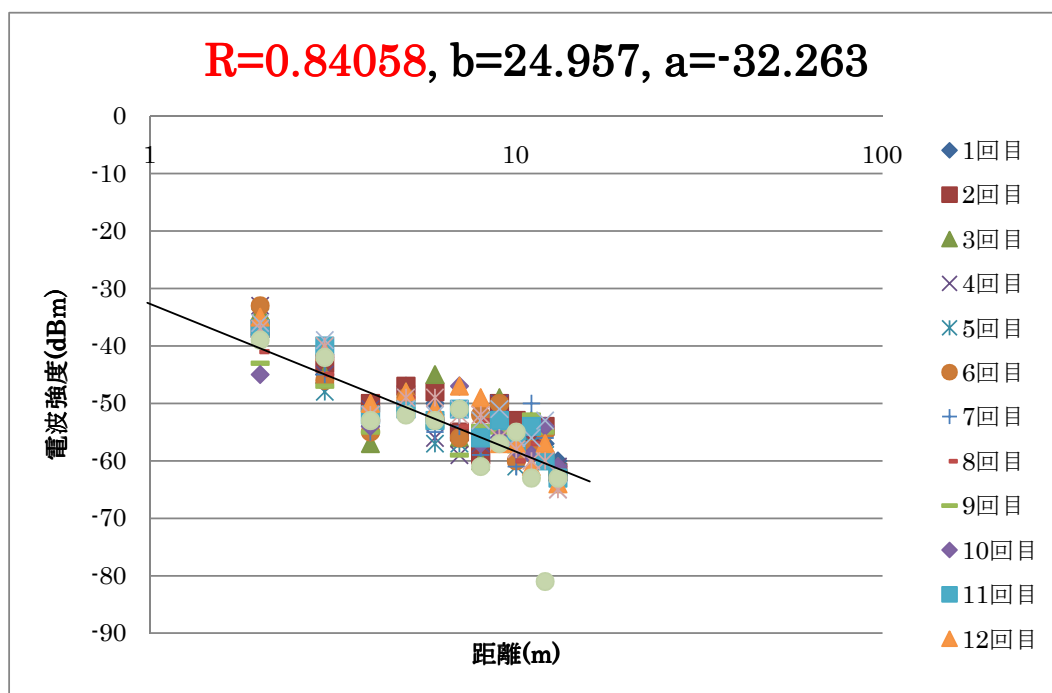


Fig. 5.3: 工学部 12 号館 309(会議室) に置かれた AP における r-S 座標グラフと log<sub>10</sub> r-S 座標グラフの比較

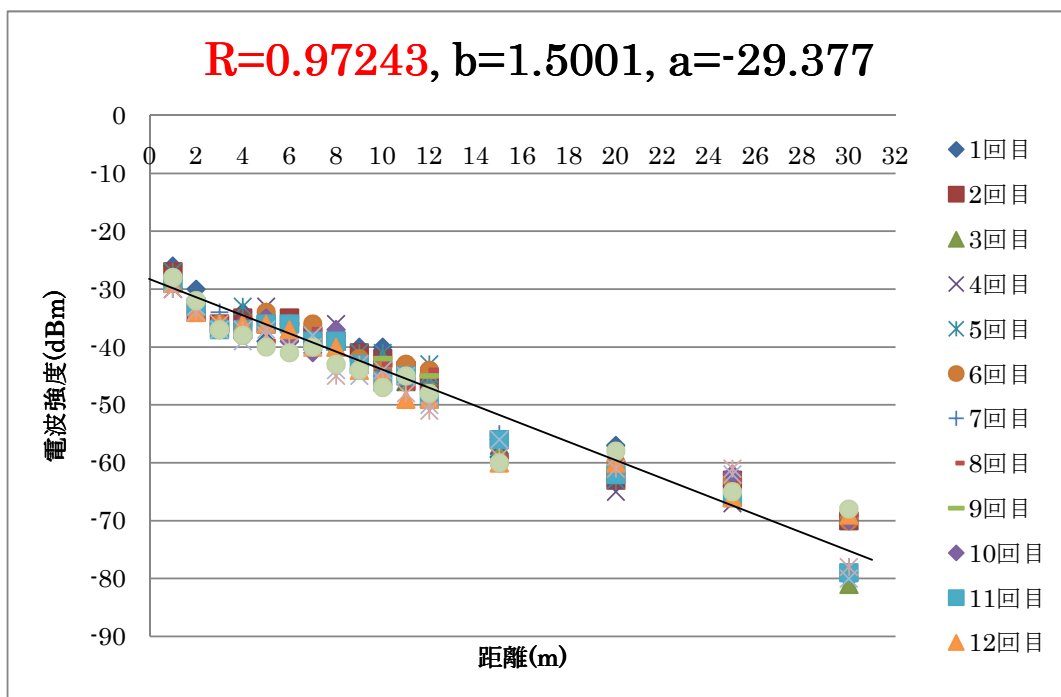


(a)r-S 座標グラフ

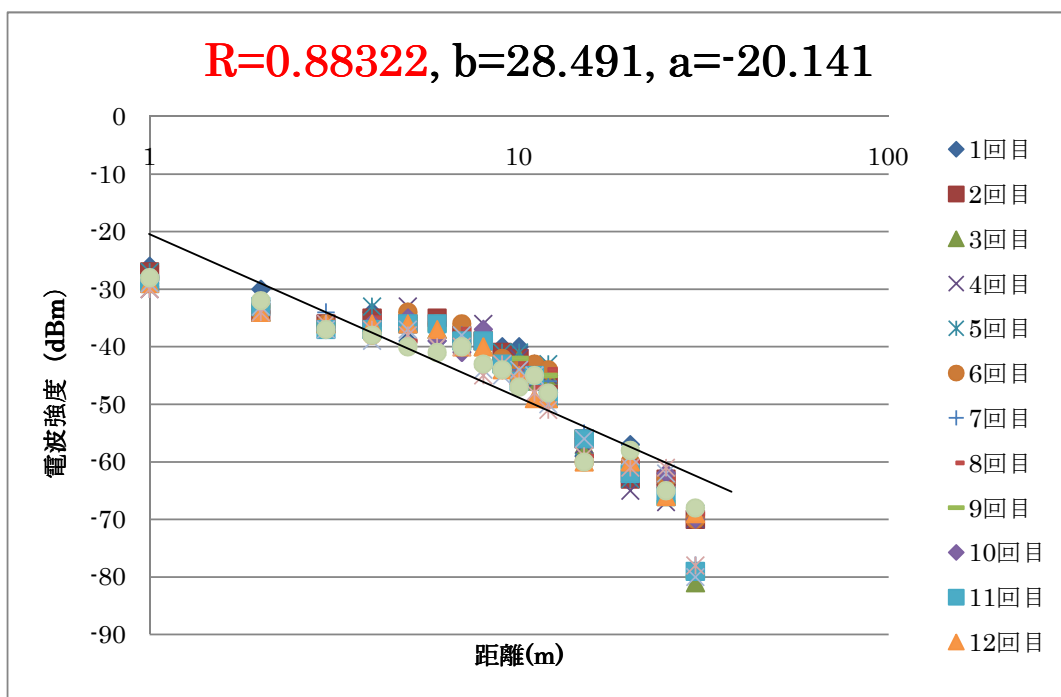


(b)(log<sub>10</sub> r)-S 座標グラフ

Fig. 5.4: 工学部2号館2Fに置かれたAP(SSID:bld2-guest)における r-S 座標グラフと log<sub>10</sub> r-S 座標グラフの比較

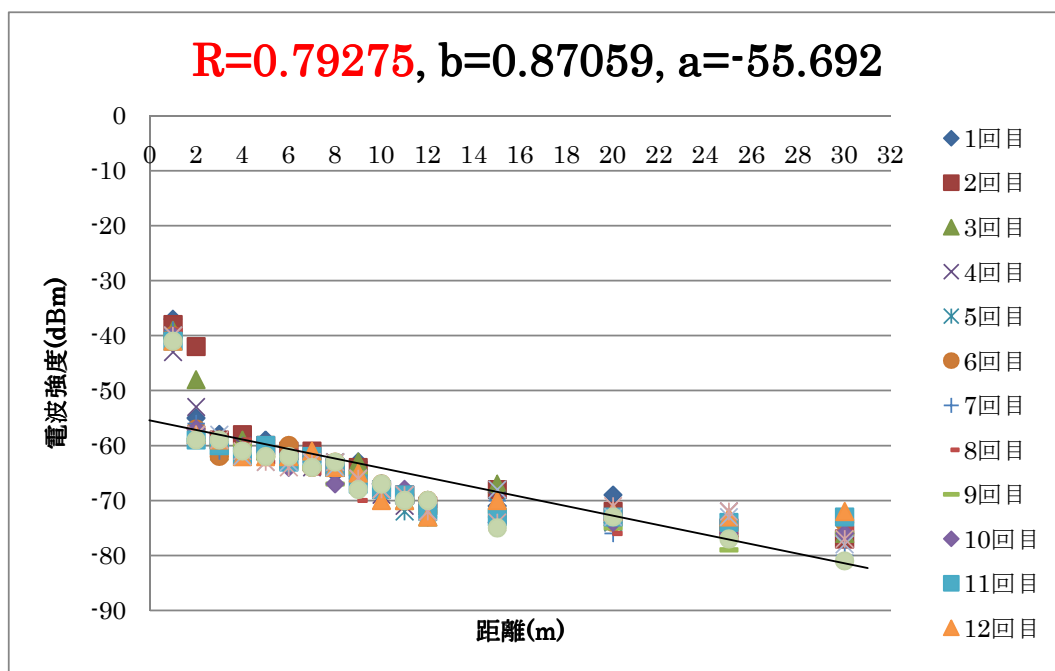


(a) r-S 座標グラフ

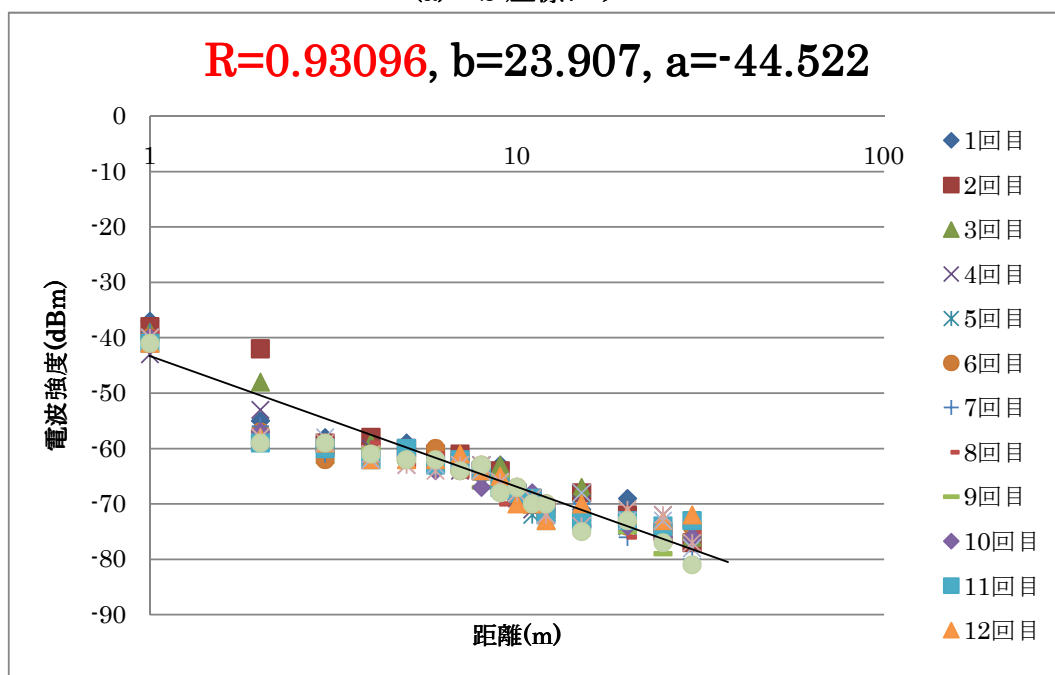


(b)  $(\log_{10} r)$ -S 座標グラフ

Fig. 5.5: 工学部 12 号館屋外に配置した AP(PCI MZK-W04N-XX) における S-r 座標グラフと  $\log_{10} r$ -S 座標グラフの比較

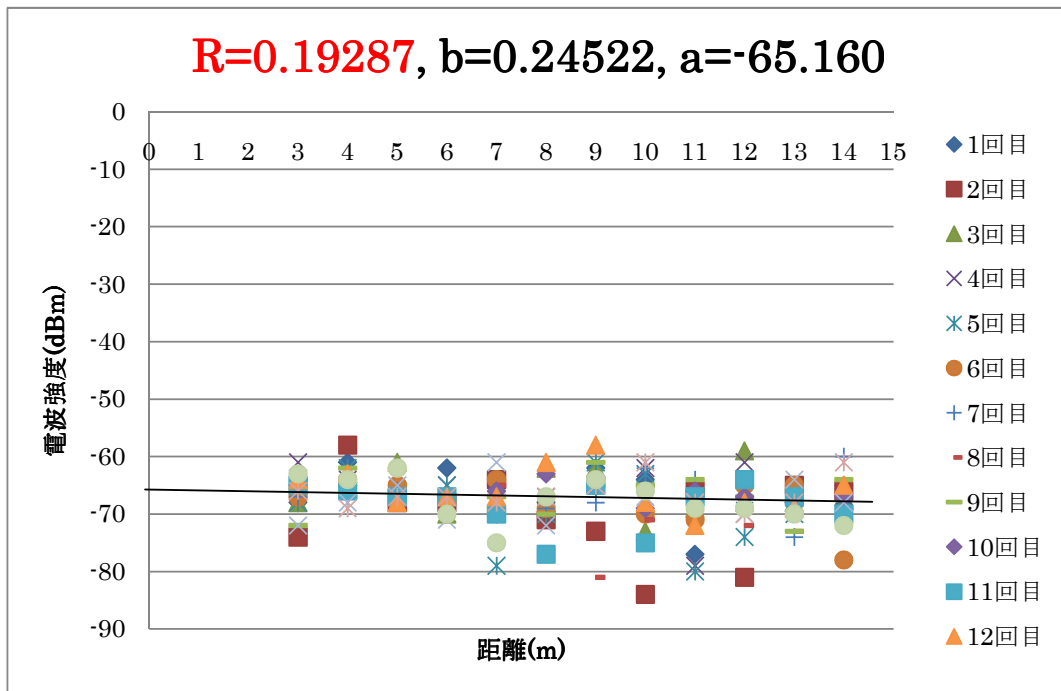


(a) r-S 座標グラフ

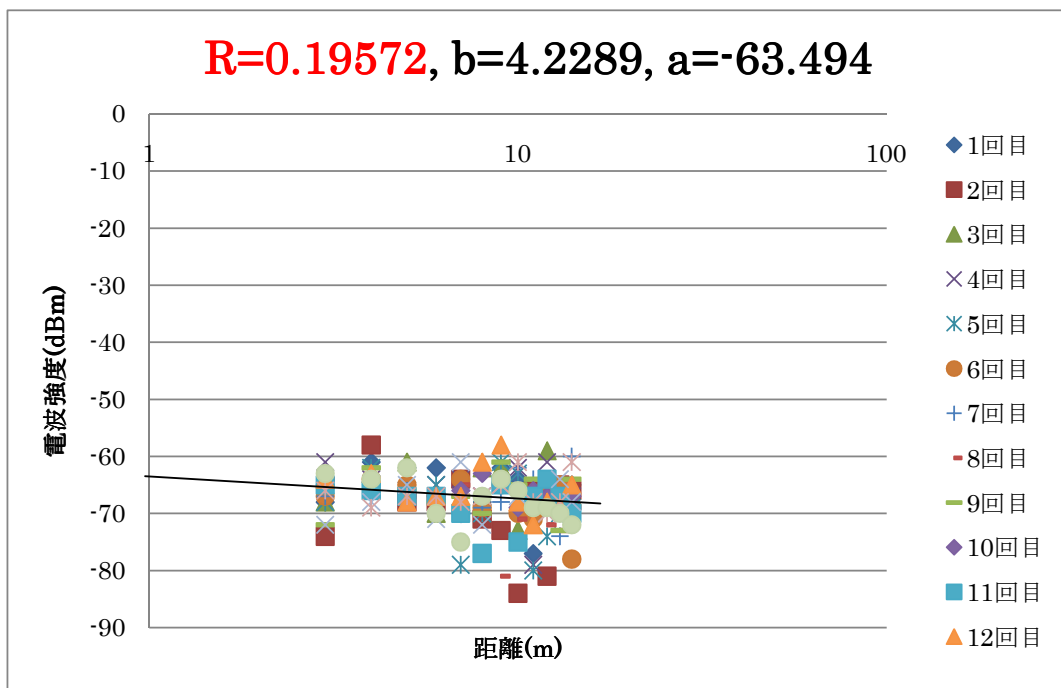


(b) ( $\log_{10} r$ )-S 座標グラフ

Fig. 5.6: 工学部 12 号館屋外に配置した AP(Airmac Express Base Station No.A 1089) における S-r 座標グラフと  $\log_{10} r$ -S 座標グラフの比較



(a)r-S 座標グラフ



(b)( $\log_{10} r$ )-S 座標グラフ

Fig. 5.7: 文京区弥生坂に設置された AP(Livedoor-fon) における S-r 座標グラフと  $\log_{10} r$ -S 座標グラフの比較

### 5.1.2 各APにおけるNotePCとPortablePCを用いた測定結果

Table 4.1にある各APに対して、電波強度と距離の関係をプロットしたものを、Fig. 5.8, Fig. 5.9, Fig. 5.10, Fig. 5.11, Fig. 5.12, Fig. 5.13に示す。総じて、Note PCとPortable PCの機種間による受信強度の違いは少ないと判断してよいであろう。よって、ここで強調しておきたいのは、Note PCで測定したものを上側にPortable PCで測定したものの下側に記述してあるが、それらを比較するよりもAP同士を比較する目で見たいということである。

各APに対して、補足をすると、

#### 工学部12号館307(相田研究室居室)のAP

工学部12号館307相田研究室のAPに関しては私物のAP(IEEE802.11n)を用い、研究室の隅に配置した。よって、1m~11m間で計測しているが全て同室内である。

#### 工学部12号館309(相田研会議室)のAP

一方、工学部12号館309(相田研会議室)のAPに関しては研究室のものをそのまま利用した。309号室は比較的狭いために、8mの測定から廊下に出て測定をし、10mの測定から向かいの部屋に入って測定を行った。

#### 工学部2号館2Fに置かれたAP(SSID:bid2-guest)

このAPは工学部2号館2階の松本楼前の廊下のAPを利用した。すべて廊下で測定したため、APと端末の間に障害物が入り込むことはなかった。

#### 工学部12号館屋外に設置したAP(PCI MZK-W04N-XX)

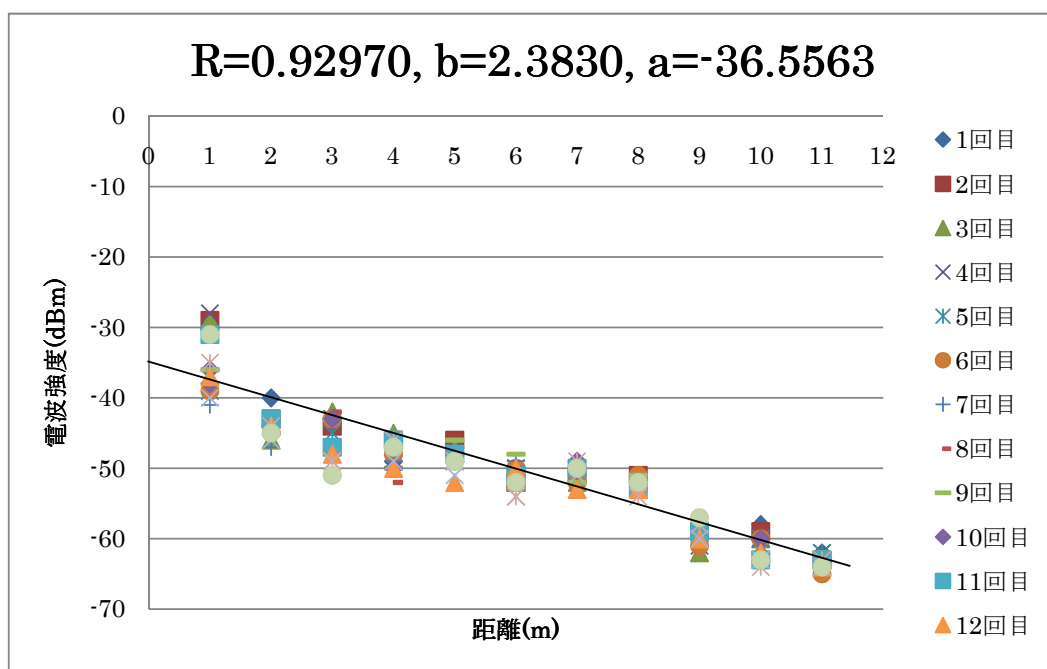
私物のAP(PCI MZK-W04N-XX)を工学部12号館の外壁にあるコンセントに差し込むことにより開設した。設置場所は非常に周りが開けた場所であり、マルチパス・フェージングの影響を最小限に留めることができると考えた。

#### 工学部12号館屋外に設置したAP(Airmac Express Base Station No.A1089)

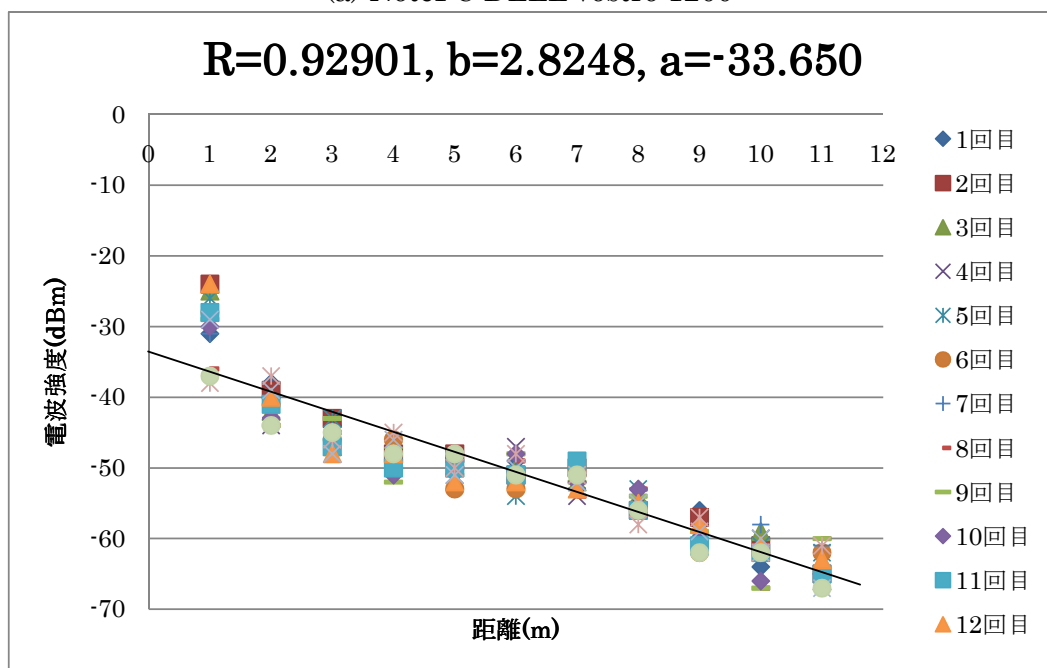
AP(PCI MZK-W04N-XX)を設置した場所と同じ場所にAP(Airmac Express Base Station No.A1089)を設置して、AP間の違いを確かめた。

#### 文京区弥生坂に設置されたAP(Livedoor-fon)

株式会社ライブドアとFON Japanが協力してFONユーザに対して設置しているAP[16]であり、本APに関しては電柱の地上5m付近に設置してある。弥生坂を含む言問通りの道沿いに建物が並んでいるが、道が広いために周りは開けている印象である。高所にあるAPであるために、APから5mの距離から測定を始めた。

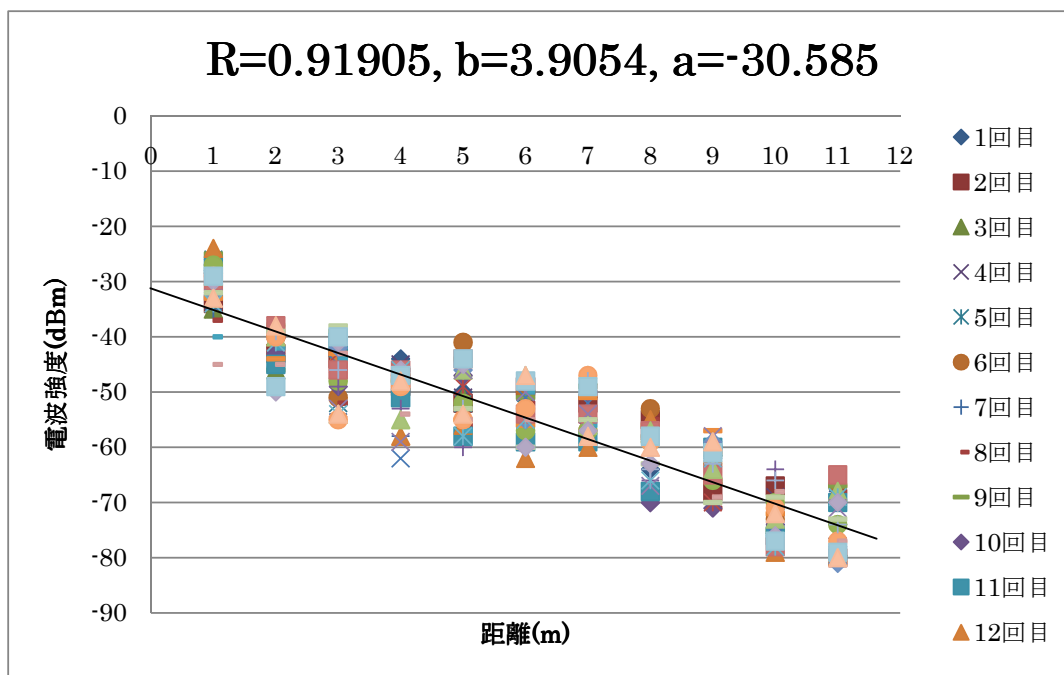


(a) NotePC DELL vostro 1200

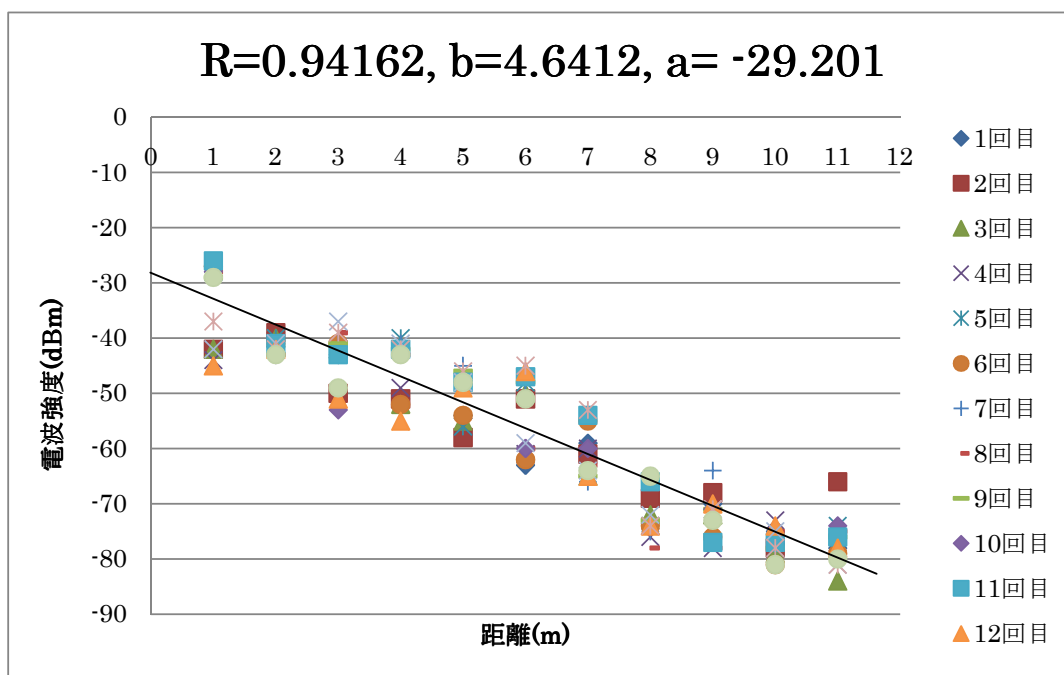


(b) PortablePC SONY VAIO VG N-UX91NS

Fig. 5.8: 工学部 12 号館 307 研究室に設置した AP における距離と電波強度の関係



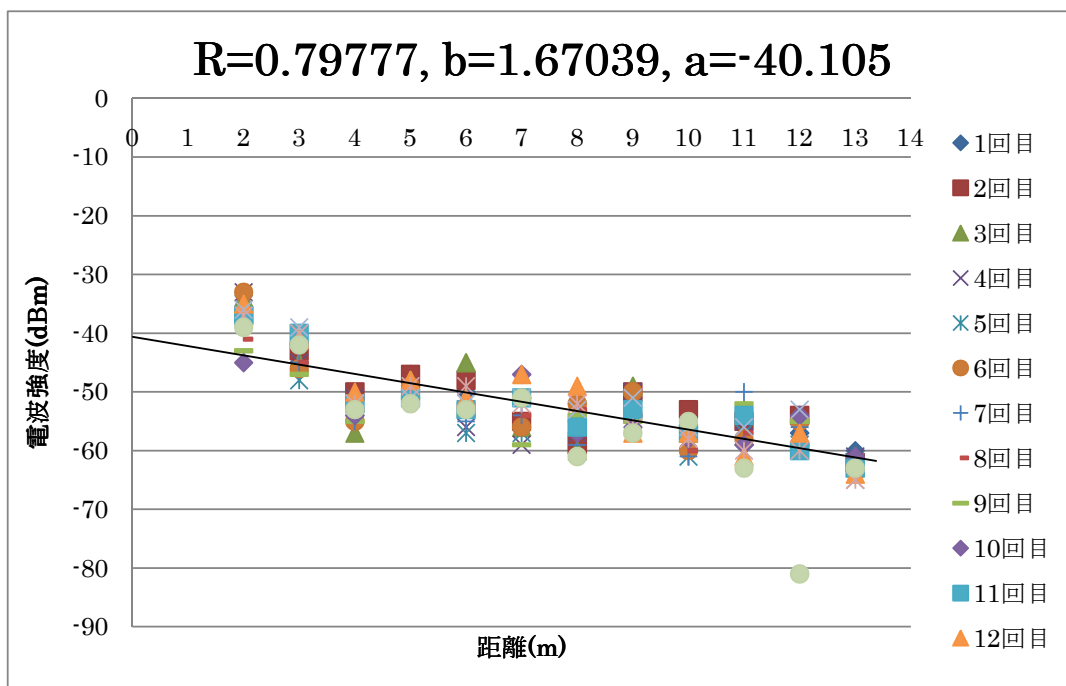
(a) NotePC DELL vostro 1200



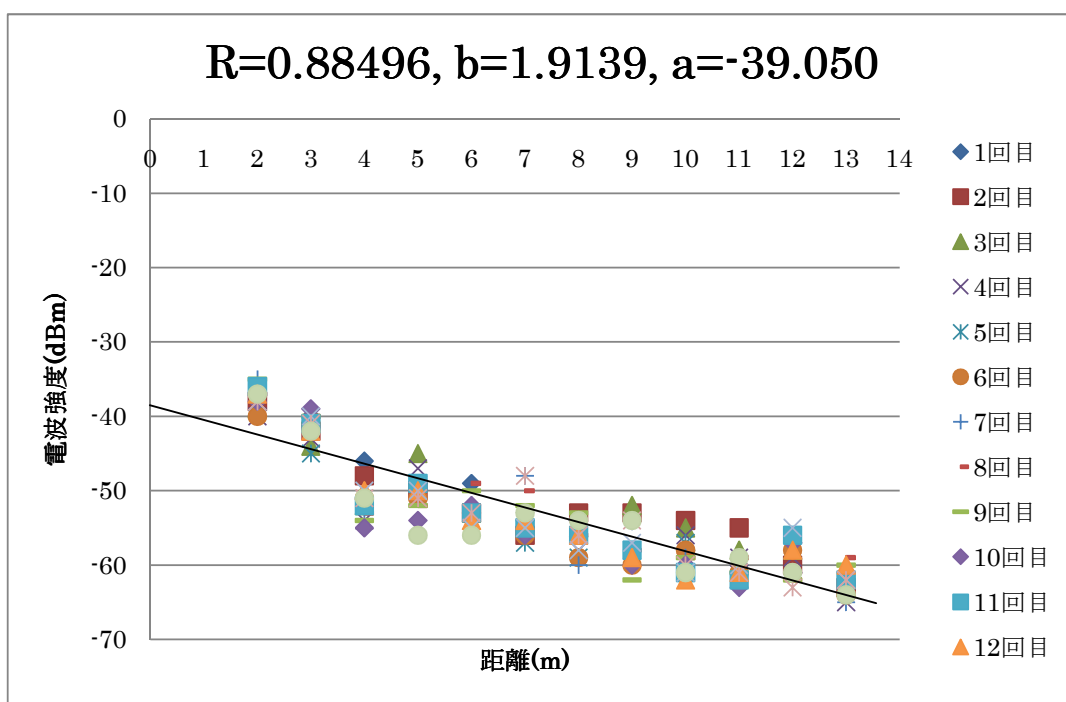
(b) PortablePC SONY VAIO VG N-UX91NS

Fig. 5.9: 工学部 12号館 309 (会議室) に置かれた AP における距離と電波強度の関係





(a) NotePC DELL vostro 1200



(b) PortablePC SONY VAIO VG N-UX91NS

Fig. 5.10: 工学部2号館2Fに置かれたAP(SSID:bld2-guest)における距離と電波強度の関係

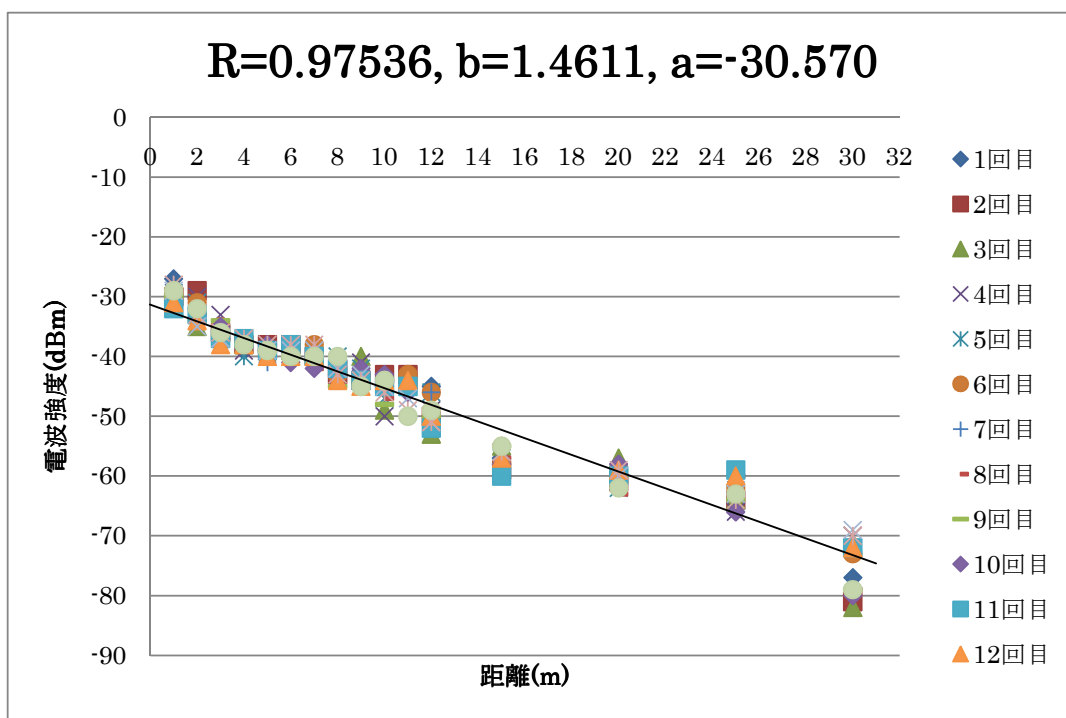
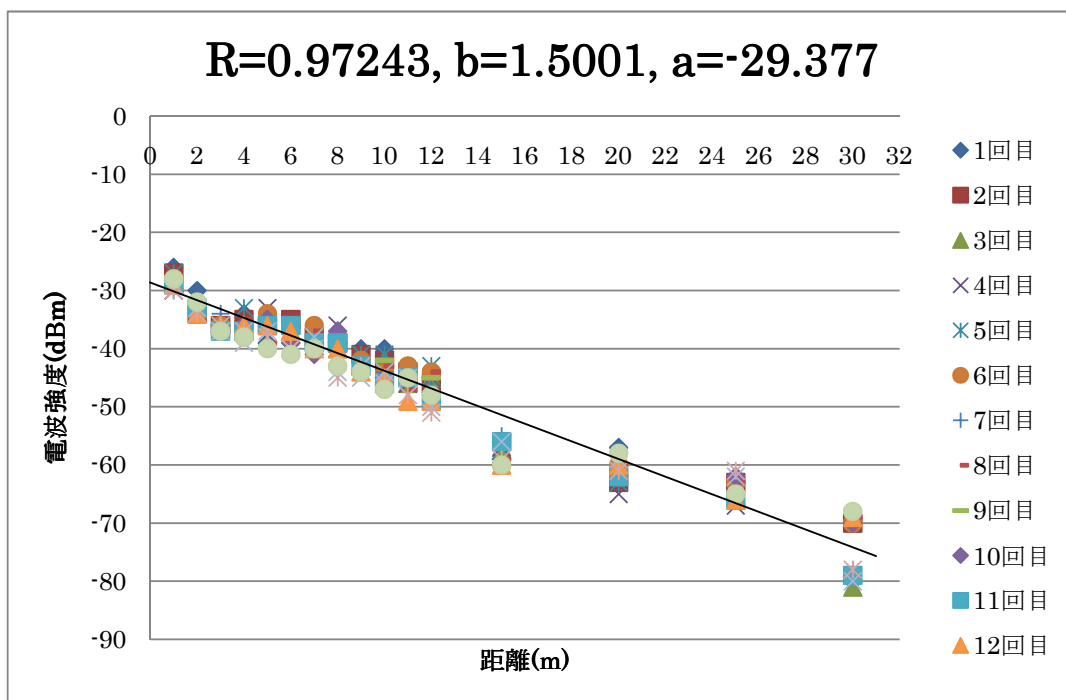
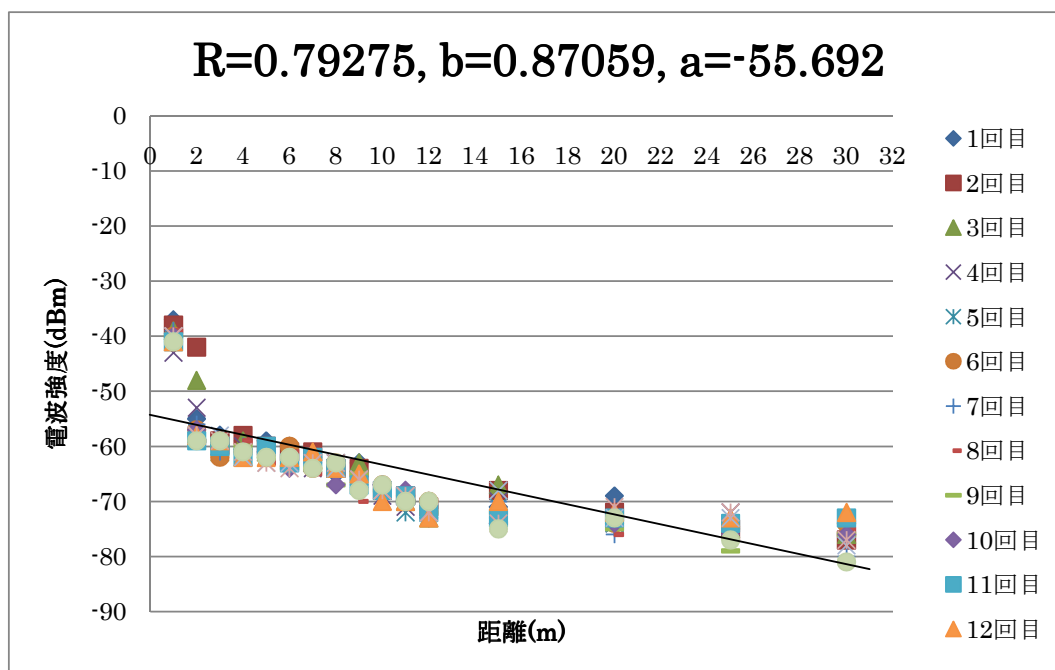
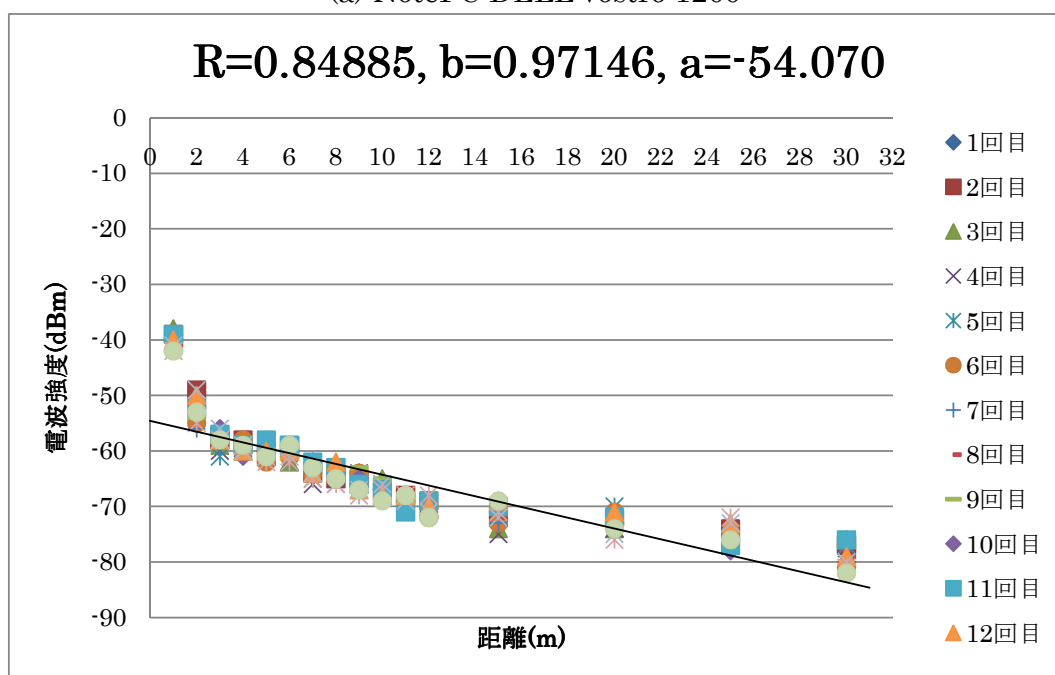


Fig. 5.11: 工学部 12 号館屋外に配置した AP(PCI MZK-W04N-XX) における距離と電波強度の関係

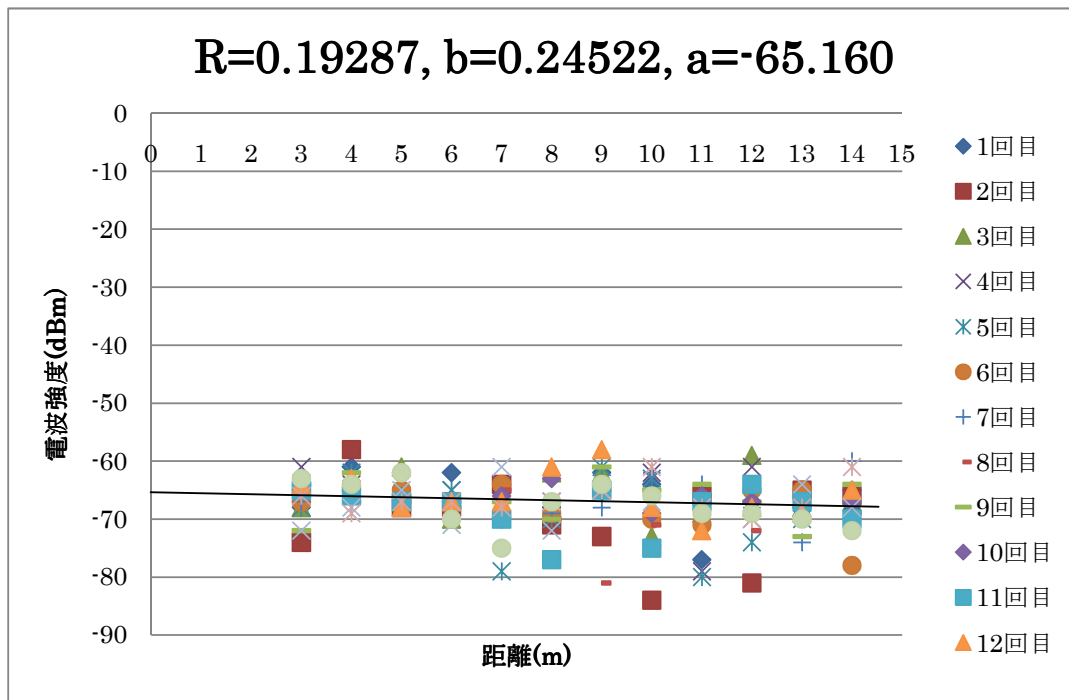


(a) NotePC DELL vostro 1200

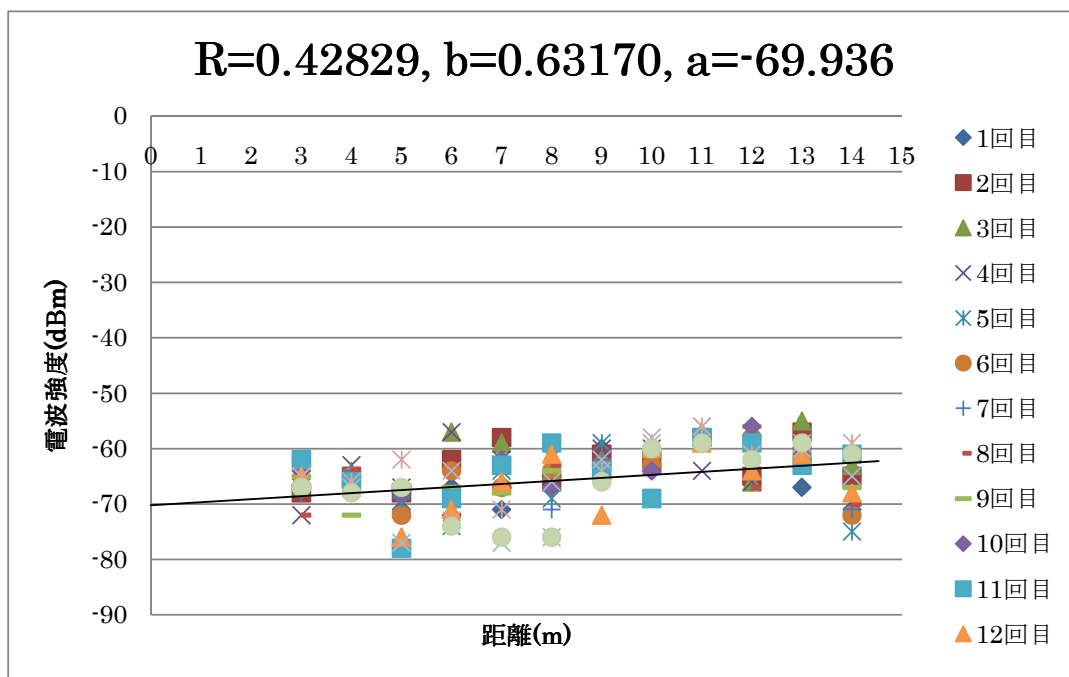


(b) PortablePC SONY VAIO VG N-UX91NS

Fig. 5.12: 工学部 12 号館屋外に配置した AP(Airmac Express Base Station No.A1089) における距離と電波強度の関係



(a) NotePC DELL vostro 1200



(b) PortablePC SONY VAIO VG N-UX91NS

Fig. 5.13: 文京区弥生坂に設置された AP(Livedoor-fon) における距離と電波強度の関係

## 5.2 確率分布図の作成

前節における電波強度と距離の関係から、各観測場所（APから距離  $r$  の地点）における電波強度のばらつきを表す、正規分布を仮定した確率密度  $P$ （確率分布）を求めた。

$$G_{\mu,\sigma}(P) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(P-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{5.1}$$

$$\mu = (\text{距離 } r \text{ での電波強度の平均}) = \frac{(\text{距離 } r \text{ での観測電波強度の総和})}{(\text{距離 } r \text{ での測定回数})} \tag{5.2}$$

ここでは、前節の6つのAPにおける実験結果より、工学部12号館屋外に設置したAP(PCI MZK-W04N-XX)の結果に確率分布を取ったものを代表として載せる（Fig. 5.14）。なお、データはNotePCのものである。

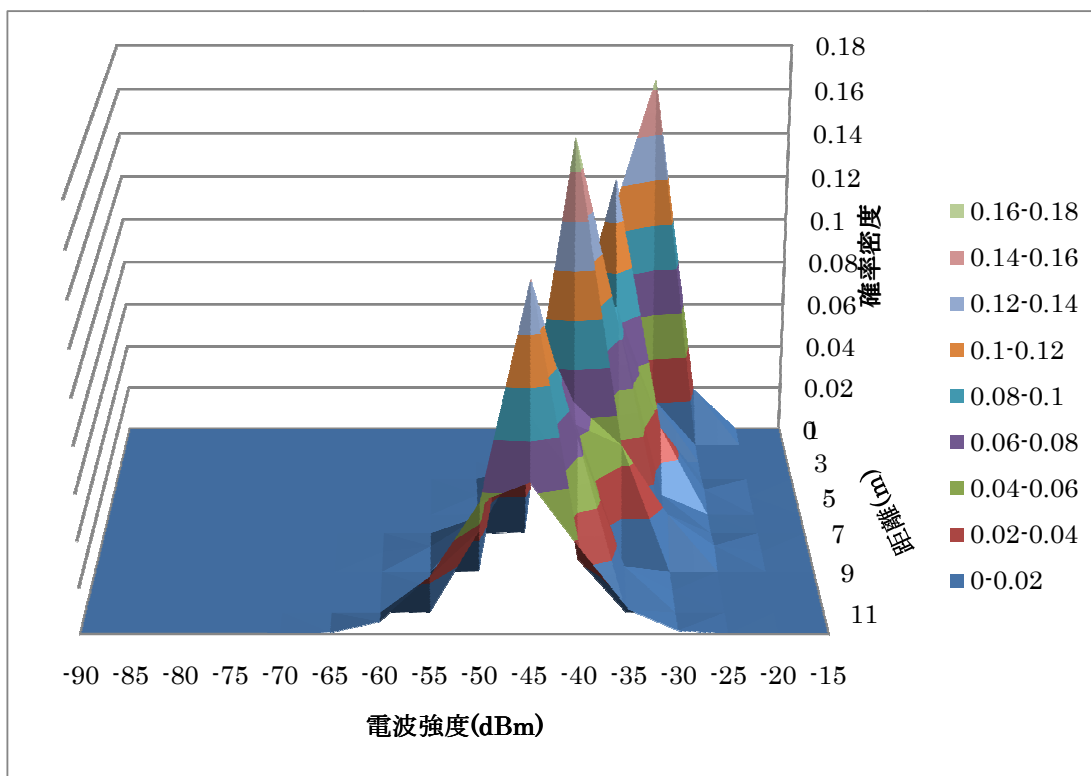


Fig. 5.14: 工学部12号館屋外に設置したAP(PCI MZK-W04N-XX)における距離・電波強度・確率密度の関係

## 5.3 考察

### 5.3.1 APごとの距離と電波強度の関係性についての考察

理論とは異なり、距離にlogを取らずにプロットを行ったが、相関係数は総じて高かった。これは、APから距離が離れるにつれてマルチパスの影響が大きくなり、理論値よりも減衰が激しくなるためであろう。ほぼすべてグラフの相関係数が0.8を上回り、0.9を超えているものもある。

ただ、AP(Livedoor-fon)に関しては、高い位置に設置されていて、アンテナの指向性があるためか、近くに設置された別のLivedoor-fonのAPの電波干渉を受けたからか、電波強度と距離の関係に相関がなかった。

また、NotePCとPortablePCの端末間の比較であるが、受信感度にほとんど違いがなかったといってもいいであろう。実際、 $b, a$ の値に関してそれぞれ、 $\pm 0.5, \pm 2$ の範囲に収まっている。

環境による違いに関しては、狭く壁に囲まれている場所よりも、開けた場所の方がより減衰の割合が小さく、かつ測定によるばらつきが少なかった。

### 5.3.2 確率分布の作成と閾値についての考察

各地点についてのばらつきに関しては、工学部12号館309(会議室)に置かれたAPと文京区弥生坂に設置されたAP(Livedoor-fon)については $\pm 20$ (dBm)、その他のAPの関しては $\pm 10$ (dBm)程度のぶれがあった。

AP(Livedoor-fon)に関しては例外として考え、工学部12号館309(会議室)に置かれたAPに対しての測定にばらつきが多く生じたのは、部屋が狭く、マルチパスによる影響をより多く受けたためであろう。

実際に各APに対して垂直方向に確率密度をとって3次元グラフをして表してみたが、AP(Livedoor-fon)以外に関しては分散 $\sigma^2$ の値も8割以上が5以下の値を取って小さく、一定の有意水準の値に対してより厳しい閾値 $P_{thr}$ を設けることが可能である。つまり、Place Engineのように、APの移設の認識に複数回による更新が必要になることもなく、見知らぬ地で突如測定を行っても、有効なAPのみにより位置推定が行われ、精度改善が期待できる。

## 第6章

---

### まとめと今後の課題

## 6.1 まとめ

本論文では、ユーザ参加型の無線LAN位置測定システムの精度を改善することを目的とし、既存のシステムの欠点となっている部分を改善すべく、独自手法を2つ提案した。

1つは、APごと、詳しくはAP自体とAPの置かれている環境ごと、に減衰係数を当てはめて、各APから端末までのより正確な距離を得ることを狙った手法である。他方は、APの移設・誤情報に対応するために、距離に対する電波強度のばらつきを確率分布にあらわし、t検定を行って条件にそぐわないAPを棄却(データベースから排除)した。

提案手法の有効性を検証するため、さまざまな環境に置かれたAPに対して、電波強度と距離の関係を測定した。その結果、周りが開けている場所ほど減衰係数が小さくなり、減衰係数を導入する妥当性が証明された。また、確率分布に関しては思ったよりも分散の値が小さくなり、移設や誤情報に対する排除が有効であることが分かった。また、最尤法を用いて、各APの確率分布のグラフを重ね合わせ、現在地を推定するとより精度が高い位置測定が行えるという見通しがとれた。

また、従来手法では、千葉県柏市にあるAPを東京都文京区に移設した場合にAPの移設を検出することができなかったが、本研究の手法を用いると可能になるに違いない。

## 6.2 今後の課題

### 6.2.1 実装

本研究では、位置推定のアルゴリズムに着目し、その提案と評価を行った。しかし、実際に位置測定システムを実現しているわけではない。このアルゴリズムを盛り込んだ、特定の場所だけでなく、いかなる場所でも測定できるようなシステムを実装する必要がある。

### 6.2.2 APが疎な部分での精度向上

本研究では、周りに感知可能なAPが3個以上存在し、各APからの距離が推定されれば推定位置が一点に決定される状況を仮定していた。しかし、実際にはAPが3個以上感知できない場所も郊外を始め多く存在するであろう。よって、感知されるAPが2個以下の場所でいかに精度を落とさずに、工夫を凝らして安定した精度で位置測定を行えるかも重要になってくる。

### 6.2.3 既存のアプリケーションとの比較

ユーザ参加型位置測定システムは、Webで公開をし、ある程度の参加者を募り、さまざまな場所の電足情報を得て初めて機能するものである。しかし、本研究のアルゴリズムを実装して、従来システムより精度の高いものが本当に実現できるかを確かめることは大きな課題である。



#### 6.2.4 情報不足区域に対する措置

本研究だけではなく、ユーザ参加型位置測定システムにおける課題として、「データベースに電測情報が入力されていない場所のAP情報をいかにユーザに訴えてアップロードしてもらえるか」というものがある。これは、ユーザに対して、「この場所の情報が不足しているから、アップロードしてください」と地図上に明示して募集する必要があるが、それ以上の策を考える必要がある。

# 謝辞

---

本研究をここまで遂行できたのは、多くの方々の協力があったからこそです。

相田仁教授には、学部時代から3年間お世話になりましたが、研究の進捗状況が芳しくない私を穏便に鼓舞してくださり、自分のペースで研究に取り組みさせていただきました。また、適切な時期に適切なアドバイスやご指導をいただき、私は円滑に研究を進めることができました。心からお礼を申し上げたい次第であります。

また、秘書の中山早百合女史には、事務の諸手続きをしていただいただけでなく、日常生活の相談にも乗っていただき大変感謝しております。

技術専門職員の千葉新吾氏には、学部時代の基礎実験から研究室の運営に渡ってお世話になり、厚く御礼申し上げます。

同期として、お互いに時には励まし合い、時にはお互いの研究の是非を議論し合った、大泉拓氏、森川貴康氏、に感謝いたします。

そして、相田研究室に配属された2007年4月から現在までの3年間、特に2008年4月からの修士課程生活において、様々な面で私の研究生活を支えてくれた研究室の先輩、後輩、研究生の方々皆様に感謝いたします。

最後に、ここに至るまで、不甲斐ない私を辛抱強く見守ってくれた家族にこの場を借りて感謝を伝えます。

2010年2月9日

## 参考文献

---

- [1] P. Bahal and V. Padmanabhan, "RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System", *In Proc. IEEE INFOCOM, Tel-Aviv, Israel*, March. 2000.
- [2] Lionel M. Ni, Yunhao Liu, Yiu Cho Lau and Abhishek P. Patil, "LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID", *Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications(PerCon'03)*, March. 2003.
- [3] Ekahau, Inc, <http://www.msol.co.jp/it/ekahau/>
- [4] 日立製作所, 無線 LAN 位置検知システム “日立 AirLocation<sup>TM</sup>2”, 2003.
- [5] 南正輝, 森川博之, 青山友紀, “超音波を用いた自律分散型位置検出システムの設計と実装”, *電子情報通信学会論文誌*, Vol.J88-A No.12, pp.1432-1441, 2005.
- [6] N.Priyantha, A. Miu, H. Balakrishnan, S. Teller, "The cricket compass for context-aware mobile applications", *Proc. 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking(Mobile Com 2001)*, pp.1-14, Rome, Italy, July. 2001
- [7] 河野隆二, “超広帯域(UWB)無線通信と今後の高度無線アクセス技術”, *電子情報通信学会誌*, 87(5), pp.396-401, May 2004.
- [8] 関口英紀, 藤井彰, 浅井雅文, 倉島茂美, 落合秀樹, 河野隆二, “センサーネットワーク用 UWB 測距技術の開発”, *電子情報通信学会研究報告*. pp.17-20, 2006.
- [9] Damien B. Jourdan, Davide Dardari, and Moe Z. Win, "Position Error Bound and Localization Accuracy Outage in Dense Cluttered Environments", *The 2006 IEEE 2006 International Conference*, Sept. 2006.
- [10] 小西勇介, 中尾敏康, “センサ信頼度を考慮した位置推定方式”, *電子情報学会研究報告.USN*, No.20080710, pp.123-128, 2008.
- [11] 伊藤誠悟, 吉田廣志, 河口信夫, “locky.jp: 無線 LAN を用いた位置情報・測位ポータル”, *情報処理学会研究報告 モバイルコンピューティングとユビキタス通信*, No.2005-MBL-34(4), pp.25-31, Sep. 2005.
- [12] 暦本純一, 塩野崎敦, 末吉隆彦, 味八木崇: “PlaceEngine: 実世界集合知に基づく WiFi 位置情報基盤”, *ソニーコンピュータサイエンス研究所, 東京大学大学院新領域創成科学研究科, インターネットコンファレンス 2006*, pp.95-104, 2006.

- [13] 柳原 健太郎, “ センサネットワークにおけるロケーション技術 ”, 電子情報通信学会誌  
Vol. 92, No. 4, pp.262-267, March. 2009.
- [14] K. Kaemarungsi, P. Krishnamurthy, “Modeling of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting” *The 23 annual joint conference of the IEEE computer and communications societies*, vol. 2, pp.1012-1022, March. 2004.
- [15] “ 総務省電波利用ホームページ ”,  
<http://www.tele.soumu.go.jp/>
- [16] “Fon Japan”,  
<http://www.fon.com/jp/>

## 発表文献

---

- [17] 藤木 慎太郎, 相田 仁, “ユーザ参加型無線 LAN 位置測定システムにおけるアクセスポイント移設の検出法”, 情報処理学会創立 50 周年記念全国大会, 2010.(予定)