

スマートメーターへの無線マルチホップ通信等の適用研究について

(株)四国総合研究所

阿部 素久

四国総合研究所 会社概要

会社概要

社名	株式会社四国総合研究所 Shikoku Research Institute Incorporated
設立	昭和62年10月1日 (四国電力株式会社より分離、独立)
資本金	1億円
従業員	127人
本社	高松市
株主	四国電力株式会社
代表者	代表取締役各社長 藤本 靖
事業内容	<ul style="list-style-type: none"> 電気事業に関する調査、研究、開発 自然科学ならびに産業上の諸技術に関する調査、研究、開発 産業経済に関する調査、研究 産業財産権、著作権等の知的財産権に関する調査、研究、管理 調査・研究・開発業務の受託およびコンサルティングならびに情報の販売 家庭用電気機器、電子応用機器、電力用機器、土木建築用機器・資材、塗料・顔料の製造、販売、賃貸ならびに電気熱供給システムの販売 農産物、花卉の生産・販売および農水産物の生産・貯蔵・加工に関する機器の製造、販売ならびに農水産物を加工した食品、食品添加物、調味料、香料の製造、販売 土木、とび・土工、電気、管、舗装、機械器具設置、電気通信、さく井、建築、塗装、鋼構造物工事業およびこれに付帯関連する工事の設計、施工、管理 研究設備等の賃貸

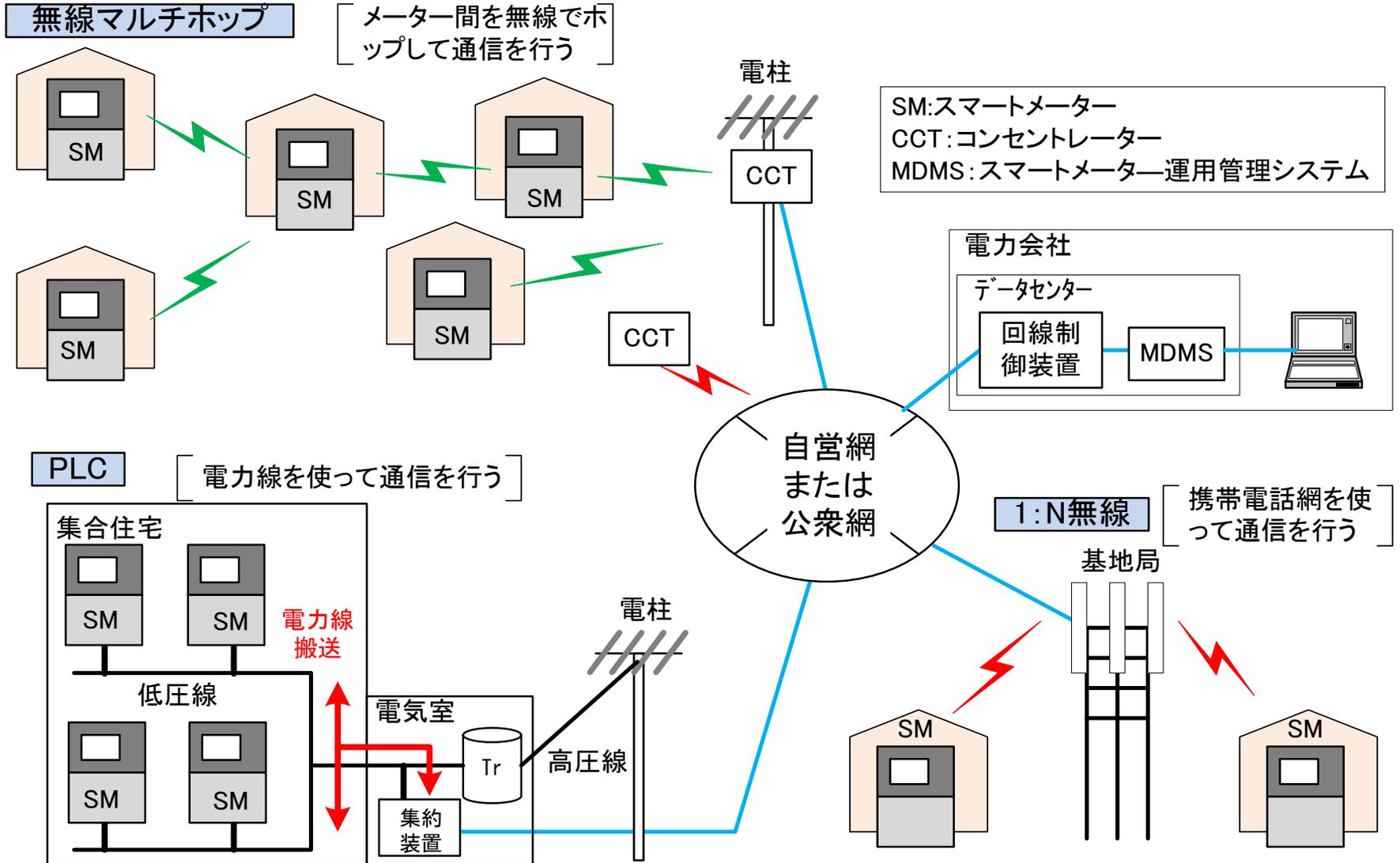
組織図

四国総合研究所	
■	総務部 ・ 総務、人事労務、経理、資材、広報
■	企画営業部 ・ 事業計画、研究企画・管理 ・ 新規事業企画、知的財産権管理 ・ 研究成果品の販売・管理
■	産業応用技術部 ・ 原子力発電所の設備保全支援技術の研究開発
■	電子技術部 ・ 各種センサ、レーザ応用技術の研究開発 ・ 通信設備の保守・建設、発電機設備の監視・計測技術の研究開発
■	電気利用技術部 ・ 産業・住宅等への効率的な電力利用に関する研究開発 ・ 農業関連技術、植物バイオ技術に関する研究開発
■	エネルギー技術部 ・ 火力発電所の燃料利用技術に関する研究開発 ・ 火力発電所の保守・発電管理技術の研究開発
■	電力技術部 ・ 電力品質維持に関する研究開発 ・ 分散型電源連系に関する研究開発 ・ 高電圧技術、送電・配電技術の研究開発
■	土木技術部 ・ コンクリートの構造物劣化診断技術の研究開発 ・ 地質の調査研究、土質試験・分析
■	化学バイオ技術部 ・ 火力・原子力設備の化学管理技術・環境保全技術の研究開発 ・ 化学計測、評価技術の研究開発 ・ 防食塗料、防食塗装技術の研究開発 ・ 微生物利用・食品加工などに関する研究開発

発表内容

1. 各種無線通信方式の伝送特性の研究
2. 3次元モデルを使ったシミュレーション
3. 簡易シミュレーションによる置局設計ツール
4. 通信接続率の予測手法

スマートメーターの通信方式(Aルート)



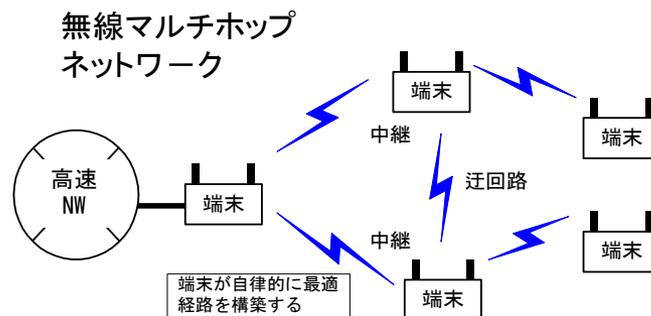
スマートメーターの通信方式

各種無線通信方式の伝送特性の研究

1. 各種無線通信方式の伝送特性の研究 —背景・目的—

無線マルチホップネットワークとは

中継機能を持つ複数の無線端末装置同士が自律的に相互接続したネットワーク



特長

- ・インフラレス
基地局やケーブル無くてもどこにでもネットワークを構築できる。
- ・広い通信エリア
電波が直接届かない離れた無線端末間でも他の無線端末を経由して通信ができる。
- ・高い柔軟性
無線端末が移動や増減しても自動的にネットワークを再構築して接続性が保たれる。
- ・高い安定性
途中の無線端末が故障したり電波環境が劣化した場合でも迂回路により接続性が保たれる。

電気事業への応用範囲

- ① スマートメーターネットワーク
- ② 設備保全ネットワーク
- ③ 非常災害時の一時的ネットワーク

課題(スマートメーターに関して)

- ① 実環境での性能が未確認である。
- ② アプリケーション要件や環境に応じた設計手法がない。

研究目的

- ・スマートメーターへの適用が想定される無線通信方式の実環境での性能を検証する。
- ・机上でシステム設計や評価ができるシミュレーション手法を開発する。

1. 各種無線通信方式の伝送特性の研究 — 無線通信方式 —

検証した無線通信方式

無線通信方式	429M特小 ^(※1)	950M特小 ^(※1)	PHS	無線LAN
周波数帯	400MHz帯	950MHz帯	1.9GHz帯	2.4GHz帯
無線規格	ARIB STD-T67	ARIB STD-T96	ARIB STD-28	IEEE 802.11g
送信電力	10mW	10mW	10mW ^(※2)	10mW/MHz
変調方式	2-FSK	FSK	$\pi/4$ DQPSK	OFDM
通信速度	4800bps	66kbps	32kbps	54Mbps
外部IF	USB	接点	RS232C	LAN
測定項目	電波強度 パケットエラー率	電波強度 状態変化	電波強度 スループット	電波強度 スループット

※1) 特定小電力無線

※2) 時間平均値

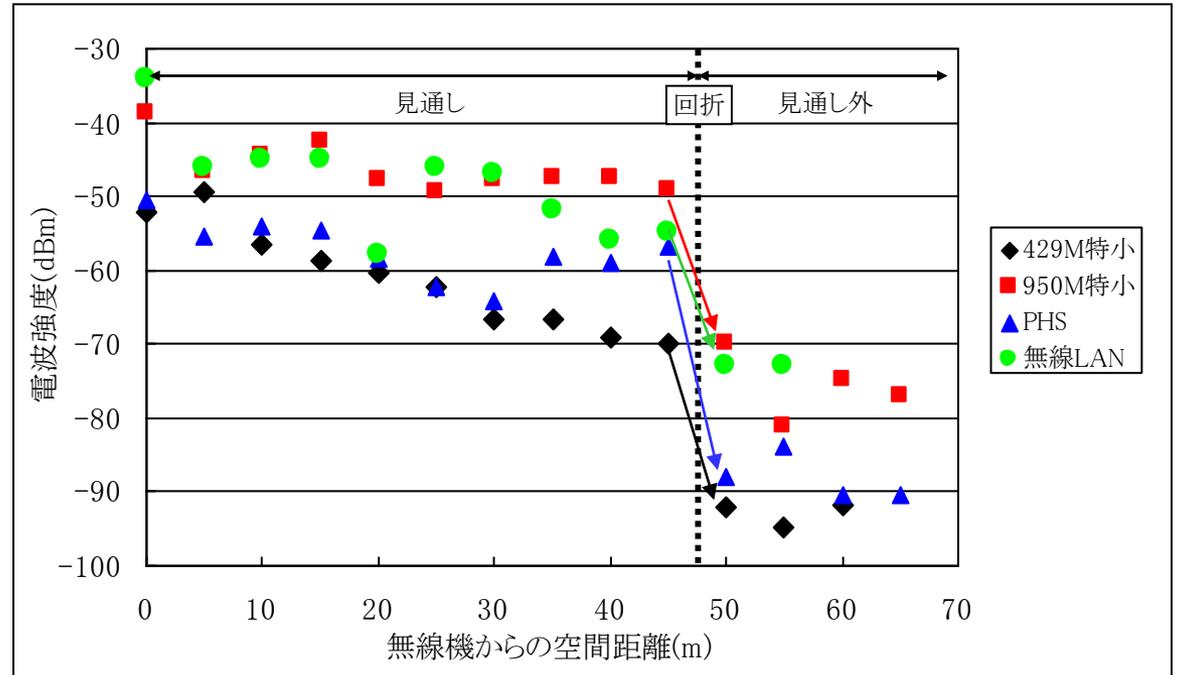
1. 各種無線通信方式の伝送特性の研究 — 建物角での回折 —

- 電波は見通し外でも回折によって伝搬する。各種無線通信方式の回折による減衰はどの程度か？
- 実環境での回折損を測定した。
 - 測定場所：四国総研敷地内
 - 建物(障害物)：本社ビル

試験方法



測定状況



建物角での回折による電波の減衰

建物角での回折損

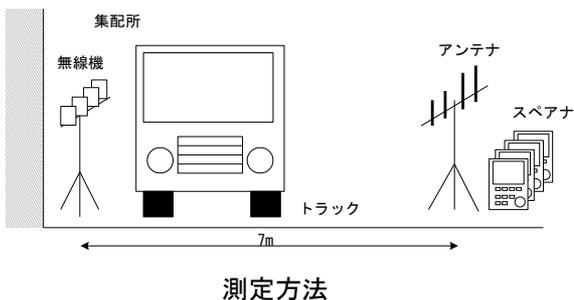
429M特小	950M特小	PHS	無線LAN
-20dB	-20dB	-25dB	-20dB

1. 各種無線通信方式の伝送特性の研究

— 宅急便トラックの影響 —

- 実環境ではスマートメーターの前にトラックが停車することがある。トラックによる電波の減衰量は？
- 宅急便トラックによる電波の減衰量を測定した。

宅急便集配箇所無線機と測定器を設置



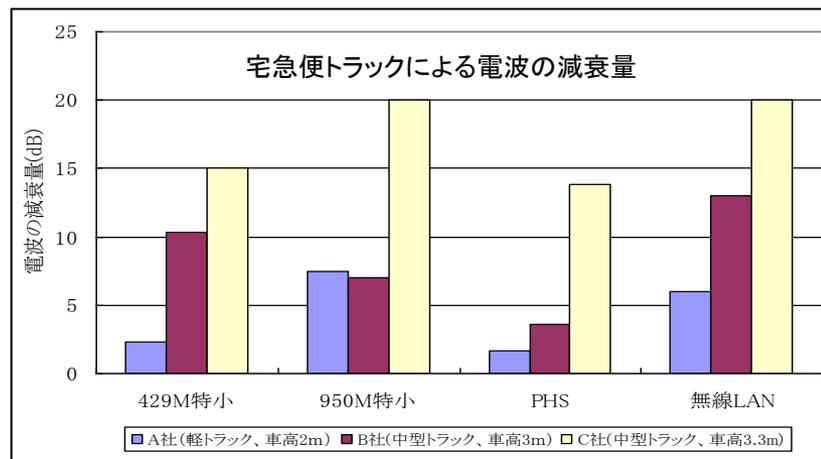
A社(軽トラック、車高2m)



B社(中型トラック、車高3m)



C社(中型トラック、車高3.3m)



- 軽トラックで約-5dB、中型トラックで-15~-20dB程度の減衰
- 一時的な通信不良は、リトライ機能で回避可能

1. 各種無線通信方式の伝送特性の研究

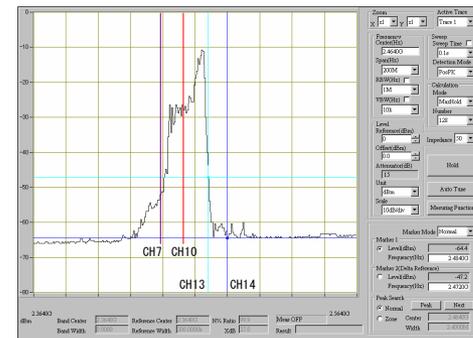
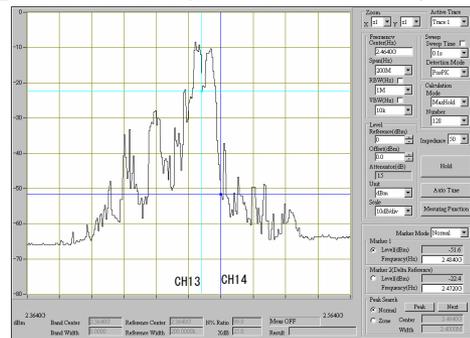
— 電子レンジの影響(無線LAN) —

- 無線LANが使用するISM帯は実環境ではノイズが多い。(ノイズ源: 電子レンジ、無線LAN)
- 電子レンジが無線LANに与える影響を測定した。

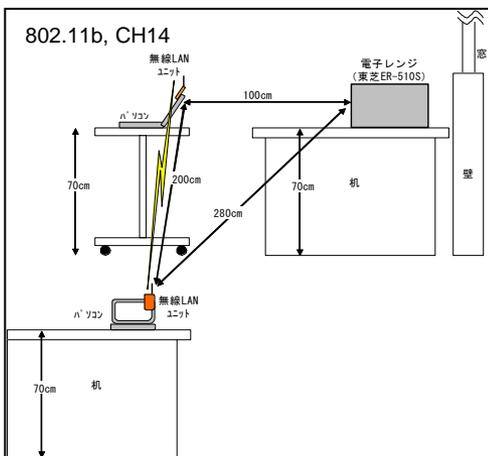
電子レンジ(定格高周波出力500W)



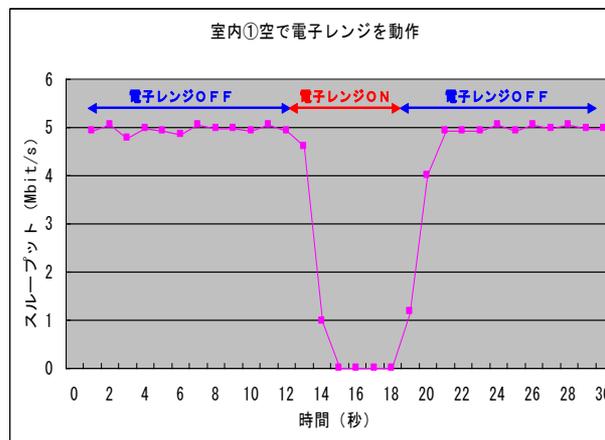
電子レンジからの放射ノイズ(2.4GHz帯)



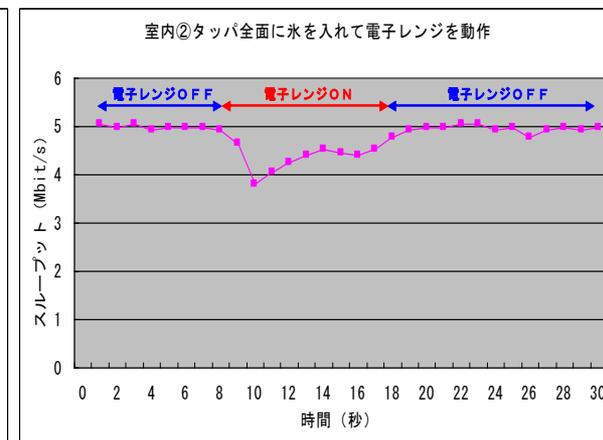
試験方法



空の場合



氷が入っている場合



空の場合の速度変化

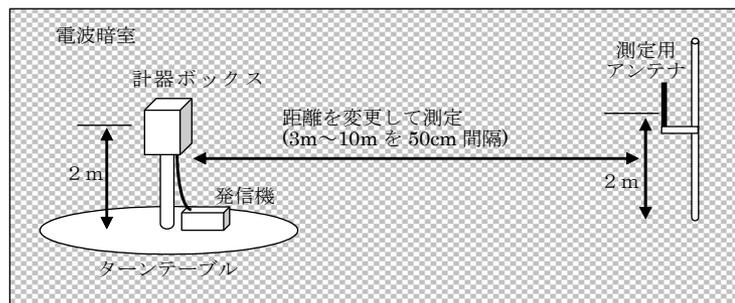
容器に氷が入っている場合の速度変化

- 電子レンジが無線LANに与える影響は大きい。
- 電子レンジの内容物や無線LANのCHによって影響の度合いは異なる。

1. 各種無線通信方式の伝送特性の研究

— 金属製計器ボックスの影響 —

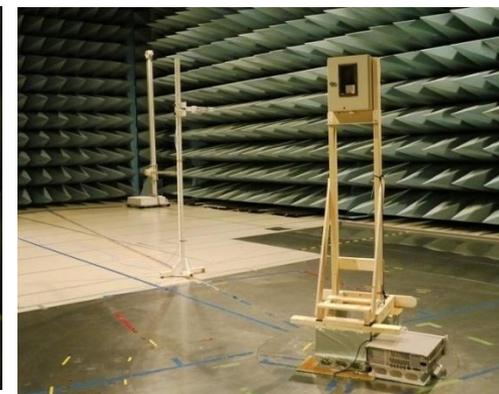
- 実環境ではスマートメーターが金属製計器ボックスの中に收容されるケースがある。金属製計器ボックスによる電波の減衰量や指向特性は？
- 各種無線通信方式を金属製計器ボックスに入れた場合の指向特性を電波暗室で測定した。



計器ボックスの影響の測定方法

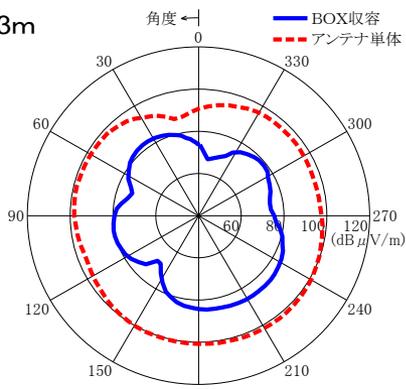


アンテナを計器ボックスに收容した状況

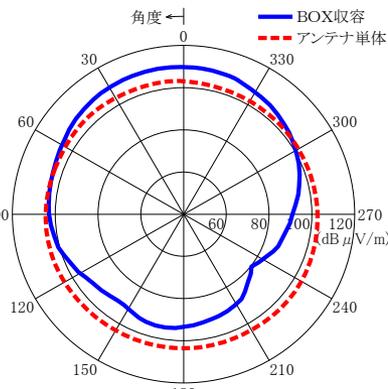


電波暗室での放射特性の測定状況

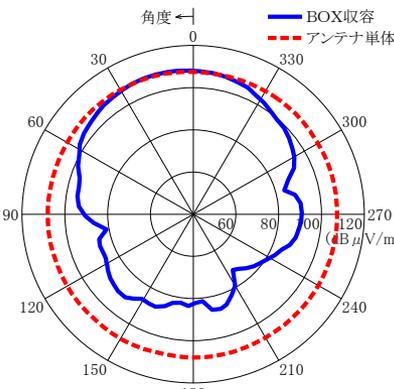
距離3m



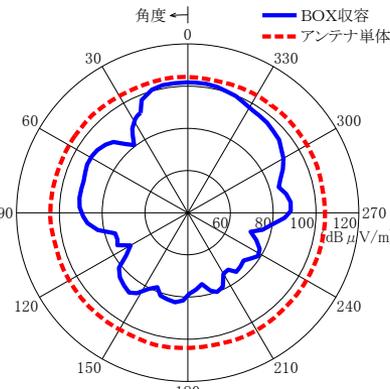
(a) 429MHz



(b) 950MHz



(c) 1.9GHz



(d) 2.4GHz

- 950MHz, 1.9GHz, 2.4GHzでは前方への指向性が見られた。また、正面方向の電波の減衰は少ない。
- 429MHzは指向性は見られなかったが、電波の減衰量は一番大きかった。

1. 各種無線通信方式の伝送特性の研究

－ 屋外での通信エリア －

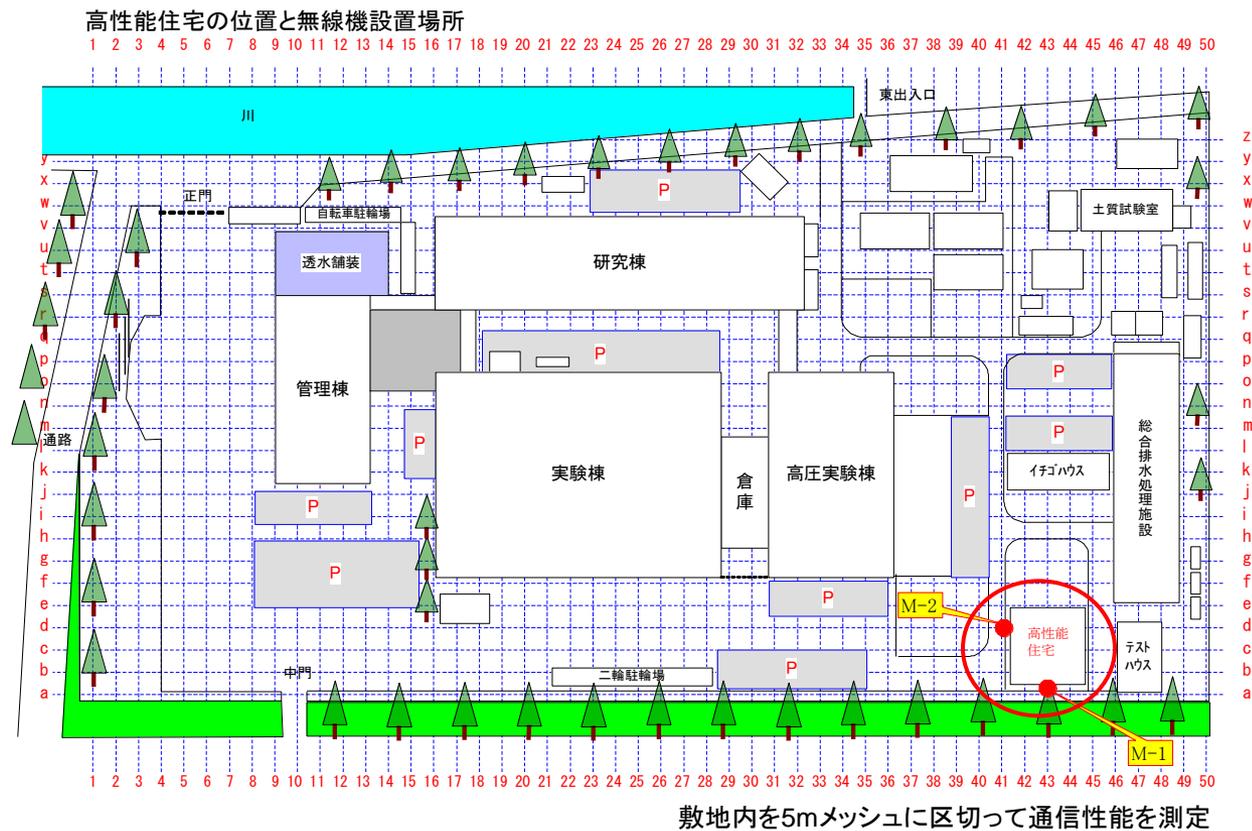
四国総研構内高性能住宅の壁面2箇所(M-1(正面はグランド)およびM-2(正面は高圧実験室))に計器ボックスに入れた無線機マスターを設置し(高さ2m)、無線機スレーブを構内各所に移動しながらマスターとの通信性能(PER、スループット、受信電波強度)を測定した。



無線機設置状況



測定状況

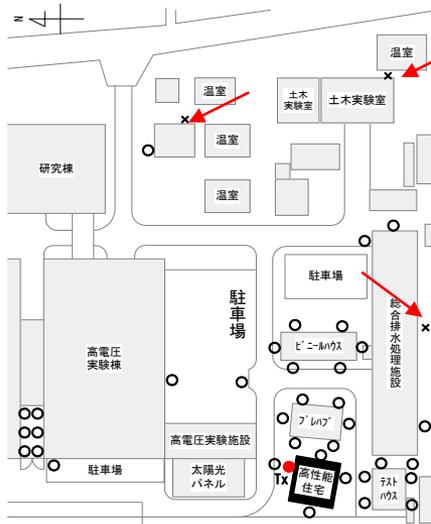


1. 各種無線通信方式の伝送特性の研究

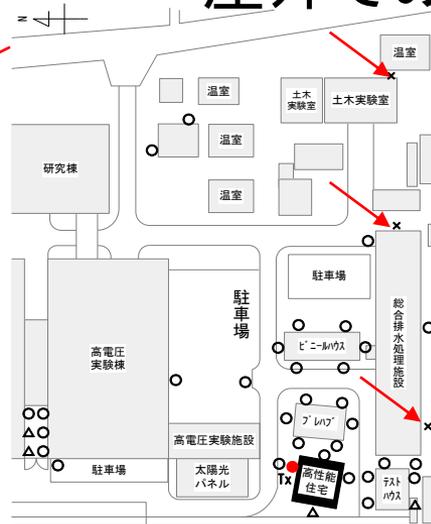
— 屋外での通信エリア —



(a)429M特小



(b)950M特小



(c)PHS



(d)無線LAN

凡例

記号	429M特小	950M特小	PHS	無線LAN
○	PER=0	通信OK	20kbps ≤ スループット	10Mbps ≤ スループット
△	0 < PER < 100%	-	10kbps < スループット < 20kbps	2Mbps < スループット < 10Mbps
×	PER=100%	通信NG	スループット < 10kbps	スループット < 2Mbps
●	無線機位置			



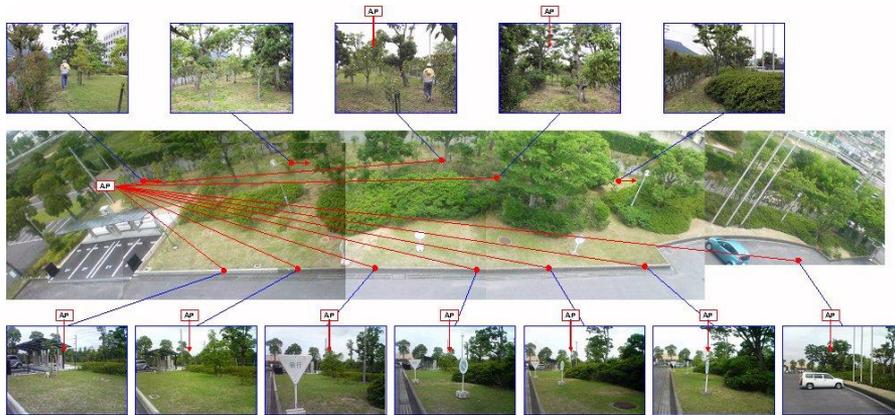
試験状況

- ・429M特小: 1箇所で通信エラーが発生
- ・950M特小: 3箇所で通信不可
- ・PHS: 3箇所で通信不可
- ・無線LAN: 見通し外で通信不可やスループット低下が多発

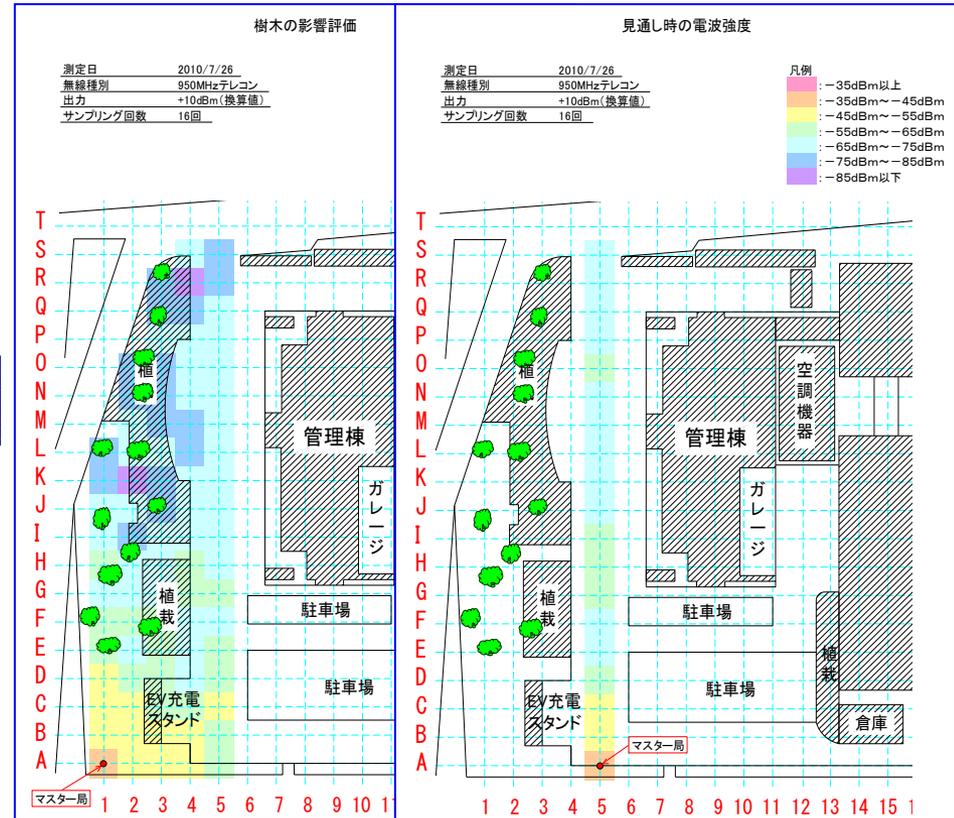
- ・429M特小、950M特小、PHS: 見通し外でも100m程度は通信可能
- ・無線LAN: 近距離でも見通し外の場合は通信不良の可能性

1. 各種無線通信方式の伝送特性の研究 — 樹木の影響 —

APの位置と周囲状況



測定状況



APの正面に樹木がある場合

APの正面に樹木が無い場合

樹木の影響 (950MHz特小)

- 樹木による電波の減衰量は-5dB~-30dB(樹木の密生度合いによって異なる)
- 周波数の違いはあまりない。

3次元モデルを使ったシミュレーション

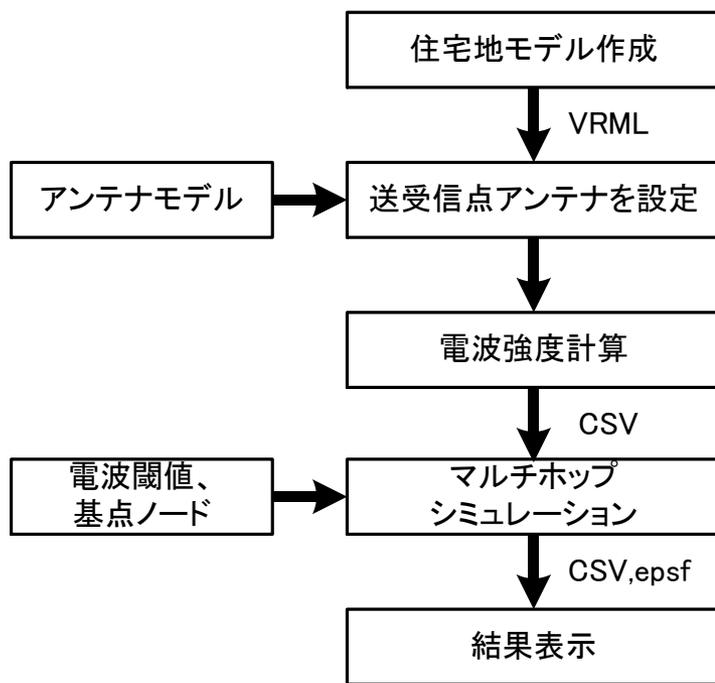
2. 3次元モデルを使ったシミュレーション

— シミュレーション方法 —

- 住宅地の3次元モデル:市販の3Dモデリングソフト(※3で作成する。
- 電波強度の計算:市販の電波伝搬シミュレーションツール(※4を使用する。
- マルチホッププロトコル:電波強度のみをメトリックとした簡易マルチホッププロトコル
- スマートメーターの接続経路とカバー率を評価

※3) SketchUp

※4) (株)構造計画研究所 電波伝搬解析ソフト「RapLab」



シミュレーションの流れ

現地調査結果を元に住宅地のモデル化をする。(建物、地形)

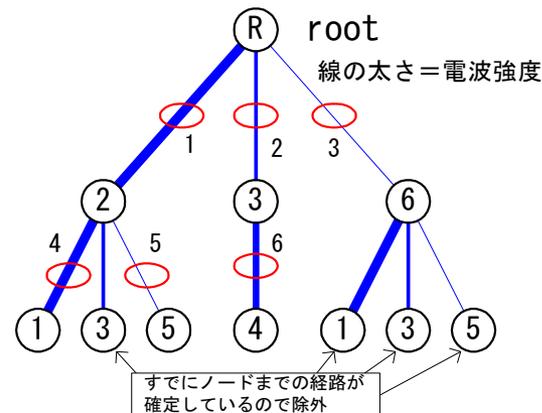
現地調査結果を元に無線機を設置
アンテナは金属ボックスの特性を模擬

すべての組み合わせの電波強度を計算

簡易マルチホッププロトコルに従って、経路を探索

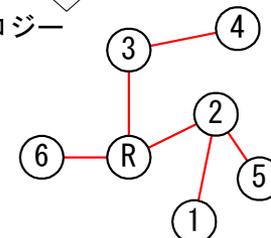
ネットワークポロジ、カバー率、ホップ数

有効経路ツリー



電波強度の強い順にパスを選択していく

最終トポロジー



簡易マルチホッププロトコル

2. 3次元モデルを使ったシミュレーション — 住宅地の3Dモデリング —

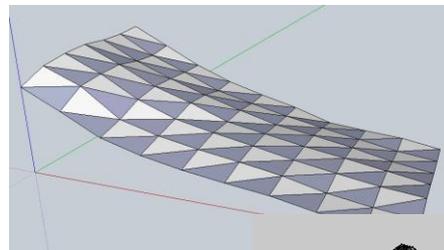
1. 地形のモデリング

- ・50mメッシュ標高データから自動作成する方法・・・荒すぎて住宅地のような狭い地域のシミュレーションには使えない。
- ・5mメッシュ標高データから自動作成する方法・・・細かすぎて電波伝搬シミュレーションツールの許容量を超えてしまう。

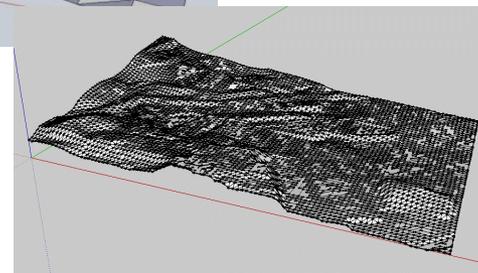


5mメッシュ標高データから5mステップの地形モデルをマニュアルで作成

50mメッシュ



5mメッシュ

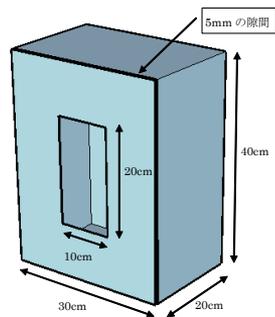


2. 建物のモデリング

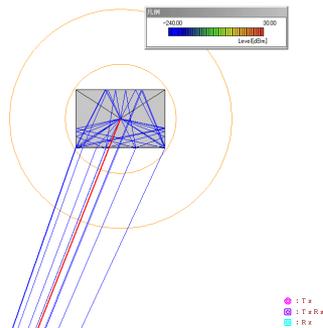
形状は住宅地図を元に作成。高さは1階を4mとし、屋根の形状は方形、材質はコンクリートとした。

3. アンテナのモデリング

計器ボックス内にダイポールアンテナを置いたときの周囲の電波をシミュレーションし、等価なアンテナパラメータを作成した。

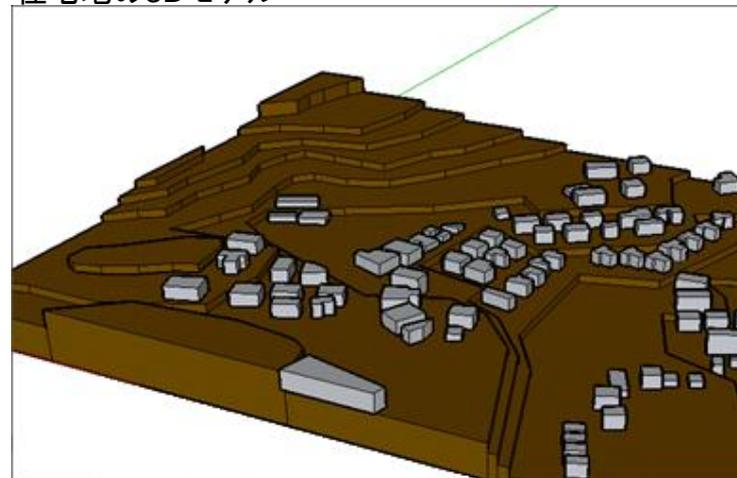


計器ボックスのモデリング



計器ボックス内の電波経路

住宅地の3Dモデル

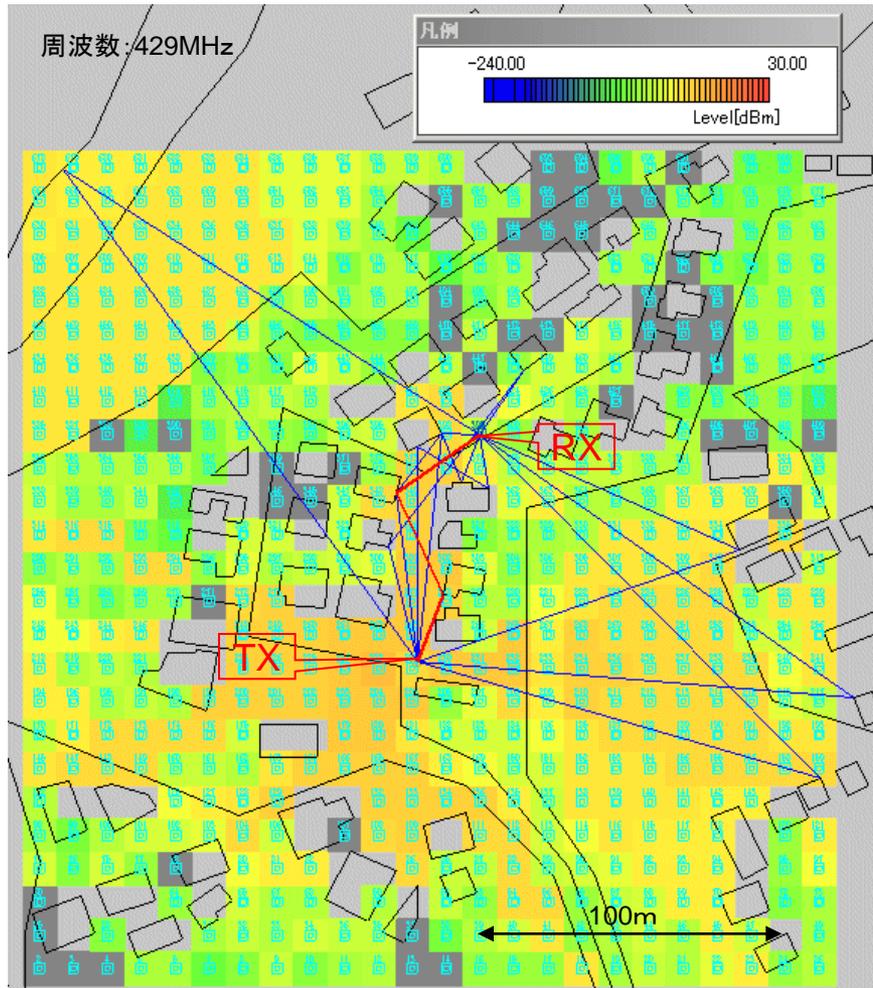


2. 3次元モデルを使ったシミュレーション

－ コンセントレーター周囲の電波状況 －

無線機を住宅地中心の電柱上に設置した場合の、周囲の電波強度をシミュレーションで求めてみた。

シミュレーション結果(赤線、青線はTXからRXまでのパスの例)



※) 薄い灰色の領域はメッシュの中心が建物内にあるため計算対象外

計算条件

周波数: 429MHz, 950MHz, 1.9GHz, 2.4GHz
出力: 10dBm
送信機高さ(地上高): 8m
受信機高さ(地上高): 2m
メッシュサイズ: 10m × 10m
測定点数: 600点 (24 × 25)
反射1回、回折1回
アンテナ: ダイポールアンテナ(2.15dBi)

シミュレーション結果

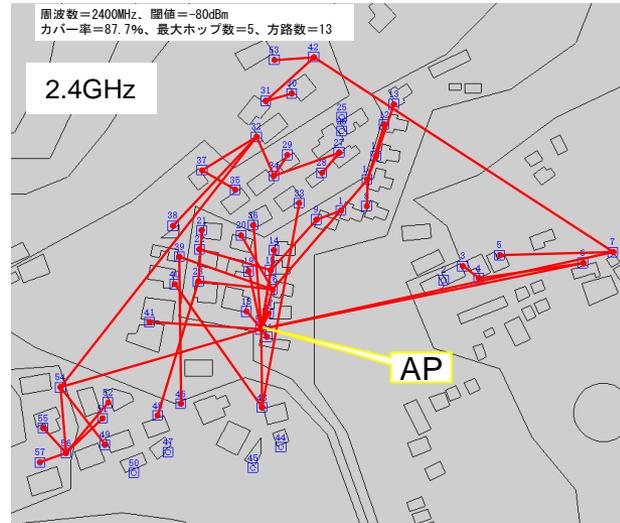
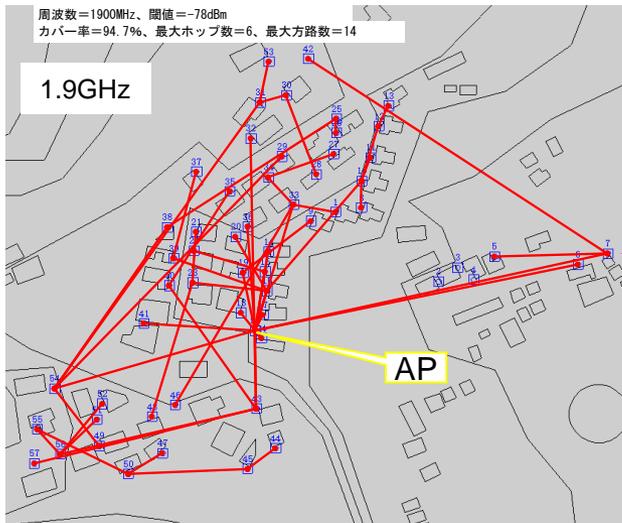
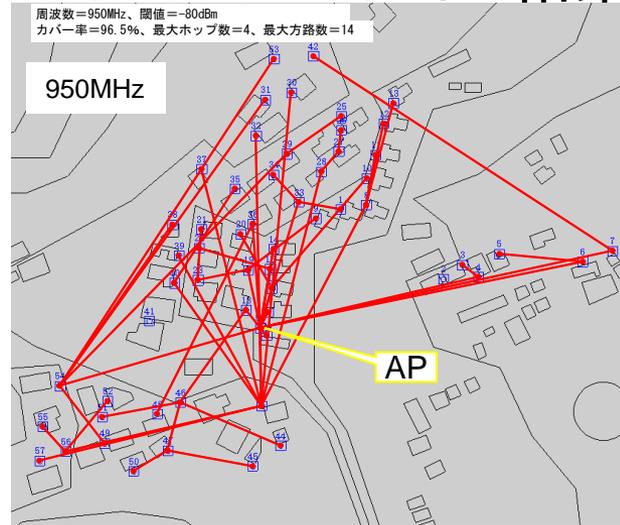
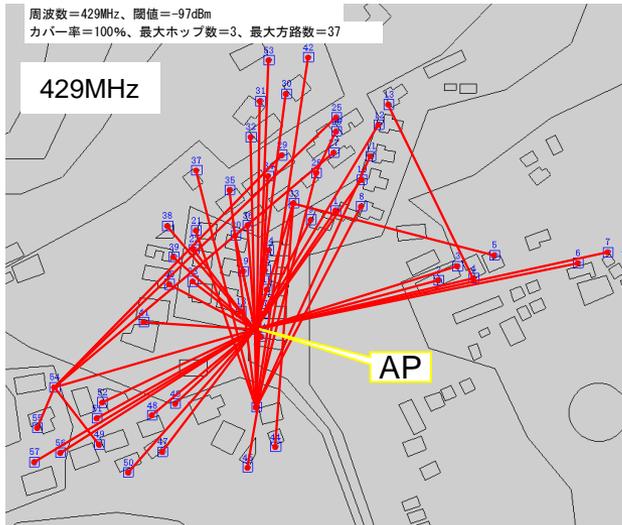
- 送信機を設置した道路沿いなどの見通しであれば黄色(約-50dBm)以上の電波強度が得られる。
- 建物の影では、送信機から遠くなるほど黄緑色(約-80dBm)、緑色(約-100dBm)と低下してくる。
- 送信機の近くでも住宅の間などでは灰色(有効パスなし)の領域がある。
- 周波数が高いほど、電波強度は小さくなるが、分布パターンはほとんど同じ。
- 平均の電波強度の違いは以下のとおり

平均の電波強度

周波数	電波強度(dBm)
429MHz	-70.61
950MHz	-78.69
1.9GHz	-86.30
2.4GHz	-89.28

2. 3次元モデルを使ったシミュレーション

— シミュレーション結果(パス) —



計算条件

周波数: 429MHz, 950MHz,
1.9GHz, 2.4GHz

出力: 10dBm

AP高さ: 8m

子機高さ: 2m

反射1回、回折1回

APアンテナ: ダイポール

子機アンテナ: BOXアンテナ

方路数制限: なし

閾値:

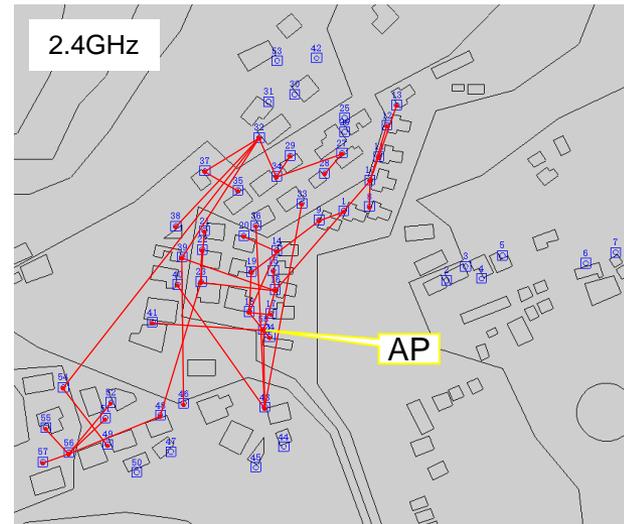
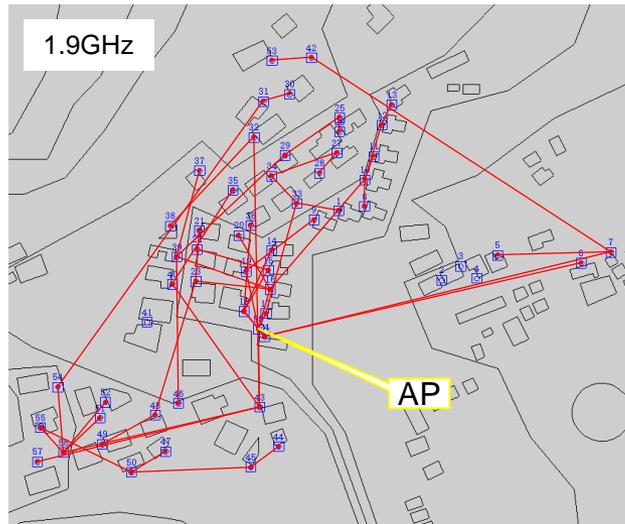
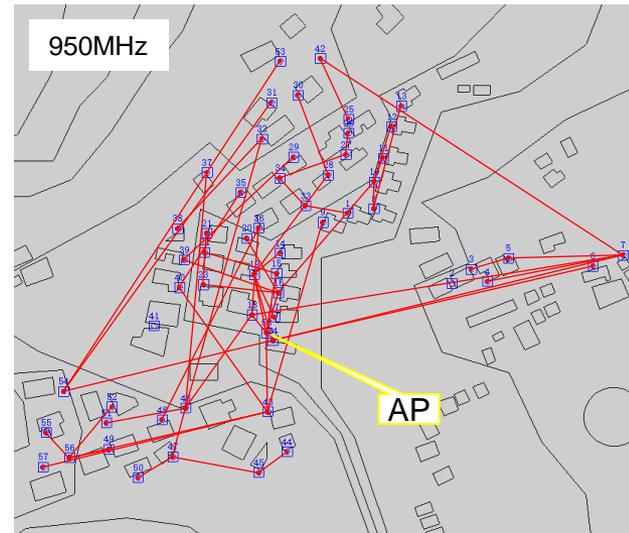
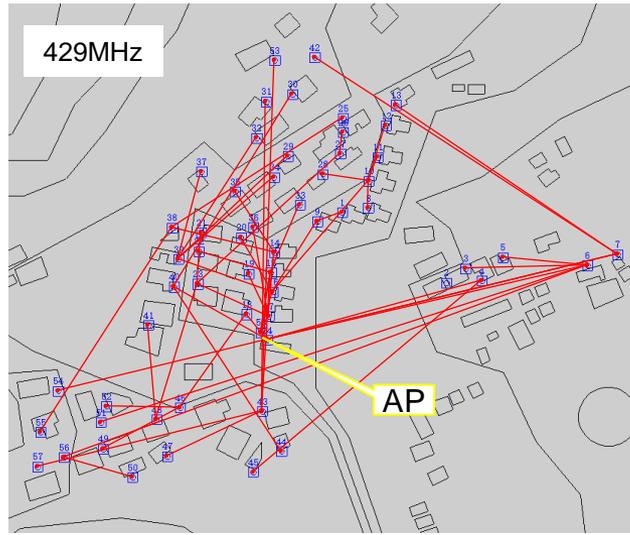
周波数	閾値
429MHz	-97dBm
950MHz	-80dBm
1.9GHz	-78dBm
2.4GHz	-80dBm

- アクセスポイントと見通しがあるノードを中心に周囲のノードをグルーピングするようになる。
- 距離よりも見通しの有無の方が影響が大きい。
- 狭い建物の間が不感地帯になる。

2. 3次元モデルを使ったシミュレーション

— シミュレーション結果(パス) —

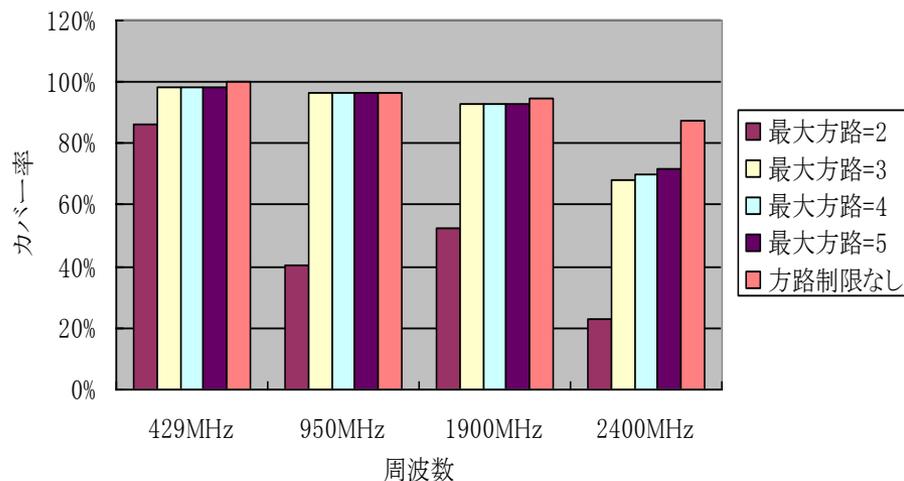
1ノードからの最大方路数を5に制限したとき



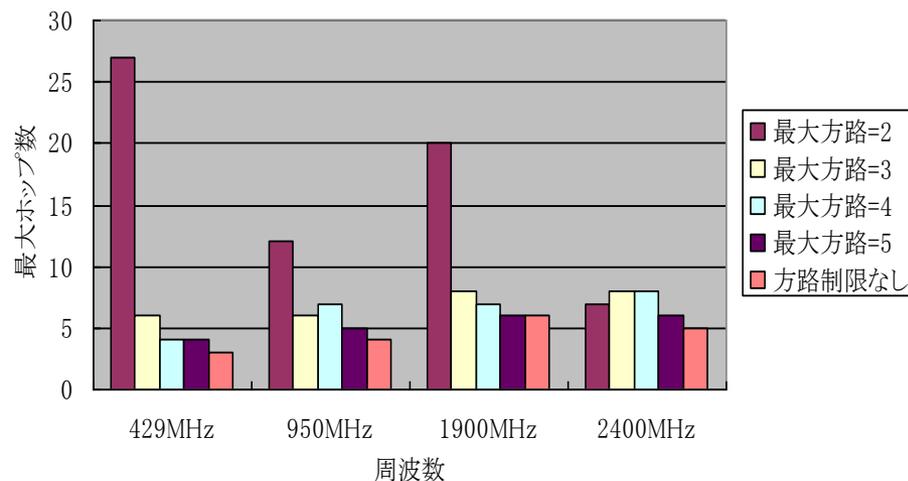
2. 3次元モデルを使ったシミュレーション

— シミュレーション結果(カバー率、ホップ数) —

最大方路数を制限したときの周波数とカバー率の関係



最大方路数を制限したときの周波数とホップ数の関係



- 周波数が低く、方路数が多い方がカバー率は高くなる。
- カバー率100%は429MHzで方路制限が無い場合のみ(狭い路地にある無線機はなかなかつながりにくいため)
- ホップ数は周波数が低いほうが少なくなる。(中継なしでアクセスポイントと通信できるノードが多いため)

2. 3次元モデルを使ったシミュレーション

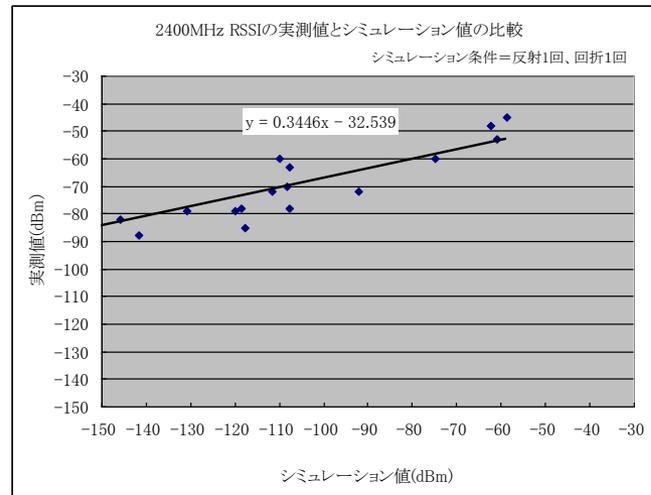
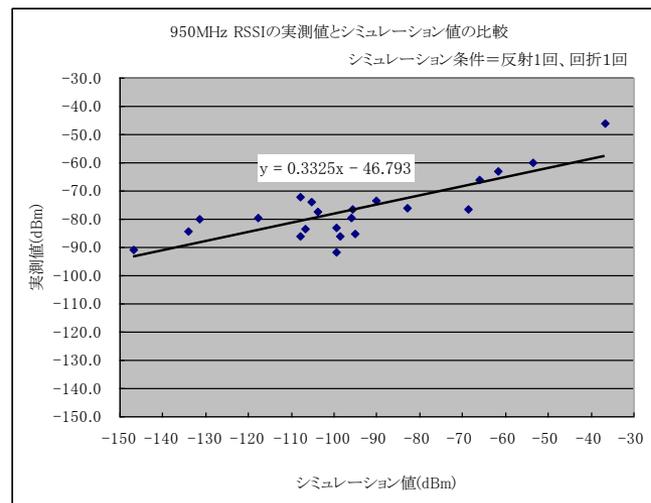
－ 実測値との比較 －



無線機設置状況 (地上6m)



無線機設置状況 (計器ボックス)



- 精度向上が課題。
- 原因: モデリングの精度 (樹木、塀、家屋形状、家屋材質の考慮なし)。
- より緻密なモデル⇒モデル化の手間、計算時間の爆発

簡易シミュレーションによる置局設計ツール

3. 簡易シミュレーションによる置局設計ツール

3次元モデルを使ったシミュレーションの問題点

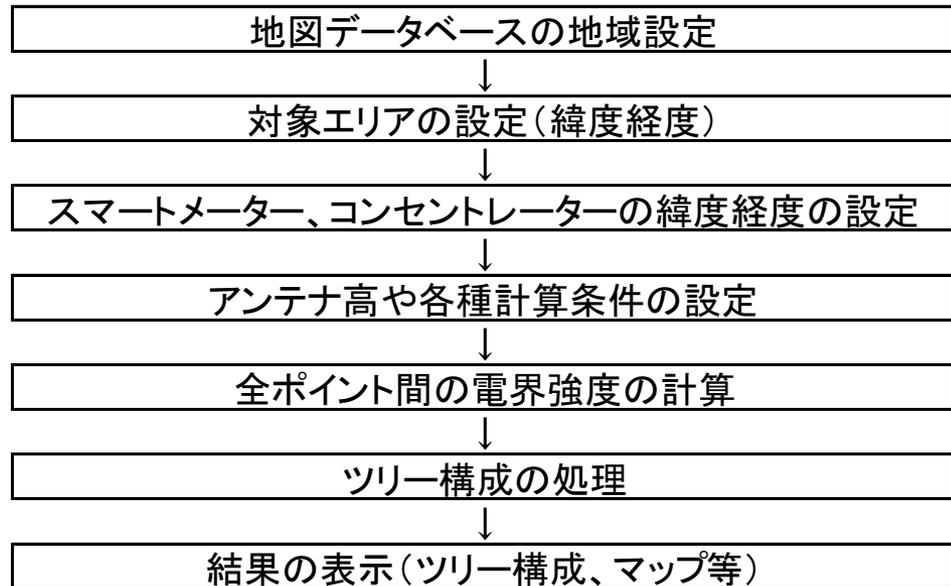
- ① モデル化に手間がかかる。
- ② 精度を上げようとするると計算時間が爆発する。

対策

- ① 住宅地図データベースを利用する
- ② 計算速度を優先した広域伝搬シミュレーションツールを利用する

広域伝搬シミュレーションツール(※5)

- ・ 簡易レイトレースによって多地点間の受信レベルを高速に求めることができるソフト。
- ・ スマートメーターの伝搬環境に適した経路探索の簡略化を行っている。
- ・ 全ノード間の受信レベルをマトリックスで出力する。
- ・ 建物情報は住宅地図データベースから読み込むことができる。



シミュレーションの流れ

※5) (株)構造計画研究所 「簡易レイトレースCUI版」

3. 簡易シミュレーションによる置局設計ツール

① 簡易レイトレース計算結果

	A	B	C	D	E	F	G
1		CO	M001	M002	M003	M004	M005
2	CO	-9999	-63.0027	-110	-56.5518	-9999	-58.1394
3	M001	-63.0027	-9999	-59.5455	-78.4892	-9999	-51.532
4	M002	-78.2706	-59.5455	-9999	-69.7041	-9999	-82.0016
5	M003	-56.5518	-78.4892	-69.7041	-9999	-9999	-86.6138
6	M004	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
7	M005	-58.1394	-51.532	-82.0016	-86.6138	-9999	-9999

② 電界強度レベル変換 [電界強度を4レベルで評価]

	A	B	C	D	E	F	G
1		CO	M001	M002	M003	M004	M005
2	CO	4	1	4	1	4	1
3	M001	1	4	1	1	4	1
4	M002	1	1	4	1	4	1
5	M003	1	1	1	4	4	2
6	M004	4	4	4	4	4	4
7	M005	1	1	1	2	4	4

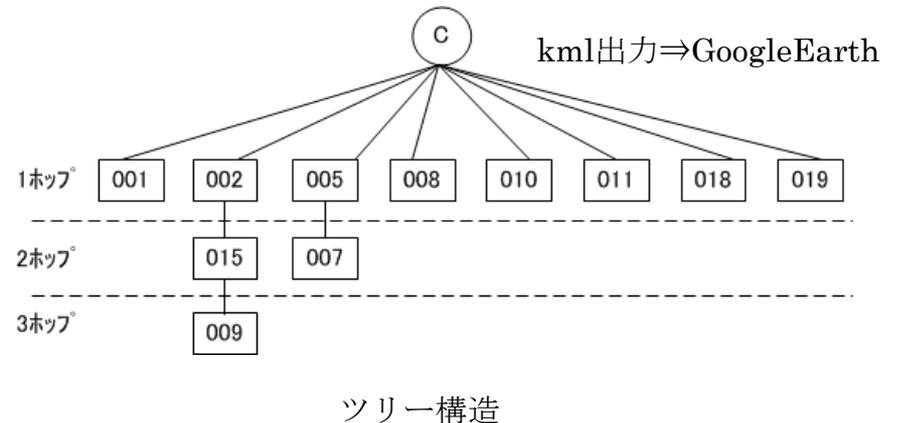
③ マルチホップツリー処理結果

	A	B	C	D	E	F	G
1		1ホップ目		2ホップ目		3ホップ目	
2	CO	M001	3				
3	CO	M002	3				
4	CO	M008	2				
5	CO	M010	2				
6	CO	M011	1				
7	CO	M018	1				
8	CO	M019	3				
9	CO	M005	3	M007	3		
10	CO	M002	3	M015	3	M009	2

ツリー処理

ツールのチューニング

- ① 戸建住宅メーター位置
 - ・ 建物形状の緯度経度情報をもとに、建物の北西外壁面に設定
- ② 集合住宅電界強度補正
 - ・ 同一集合住宅内での接続がなかったことから行わない。
- ③ 集合住宅メーター位置補正
 - ・ 上下フロア高さ3m / 同一フロアメータ間隔3m / 同一フロア戸数3戸
- ④ 電界強度閾値の補正
 - ・ 閾値: -70dBm
- ⑤ 計算条件の補正
 - ・ 反射1回 / 回折有り / 透過有り / 建物材質: コンクリート



3. 簡易シミュレーションによる置局設計ツール

●実測値との比較

- ① コンセントレーターと接続できたスマートメーターの比率（通信接続率）
⇒ほぼ一致
- ② ホップ差
⇒平均4以内の差異

●通信接続率

- ・ メーター整備率が30%で通信接続率が100%になった。

●置局設計への適用

- ・ 平均ホップ数が最小となるように置局位置をチューニングする。

課題

- ・ 建物や周辺環境の考慮
- ・ ルーティングプロトコルの改良

通信接続率の予測手法

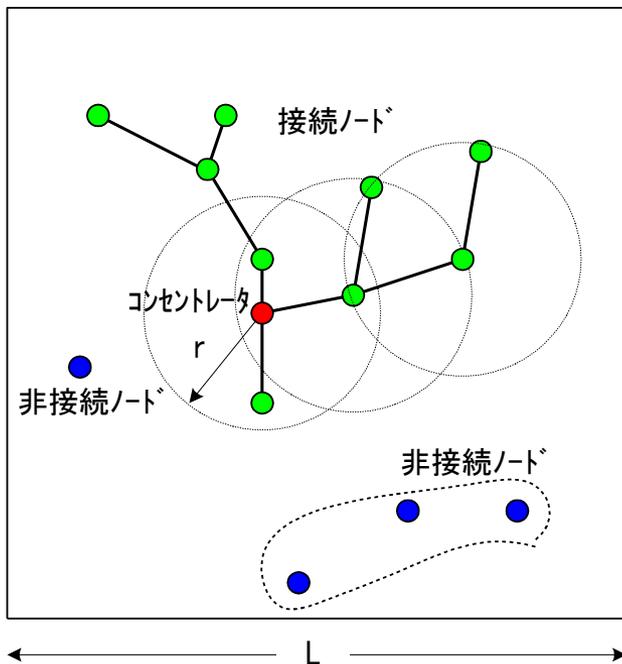
4. 通信接続率の予測手法 — 背景・目的 —

- ・ 無線マルチホップ方式のスマートメーターを導入する場合、導入初期にはコンセントレーター（集線局）までの経路が存在しないため一定割合で通信接続不能のものが出てくる。
- ・ 住宅密度により電波伝搬特性が異なるため、通信接続率の推移は地域によって異なると考えられる。
- ・ 住宅密度やスマートメーター整備率と通信接続率から通信接続率を推定することはできないか？
 - ① 平面上にランダムに配置されたノードの経路探索を行い、通信接続率を計算する。
 - ② パラメータを変化させて、スマートメーター間の密度および通信可能距離と通信接続率の近似式を求める。
 - ③ 適用する通信可能距離は実測データから推定する。

4. 通信接続率の予測手法

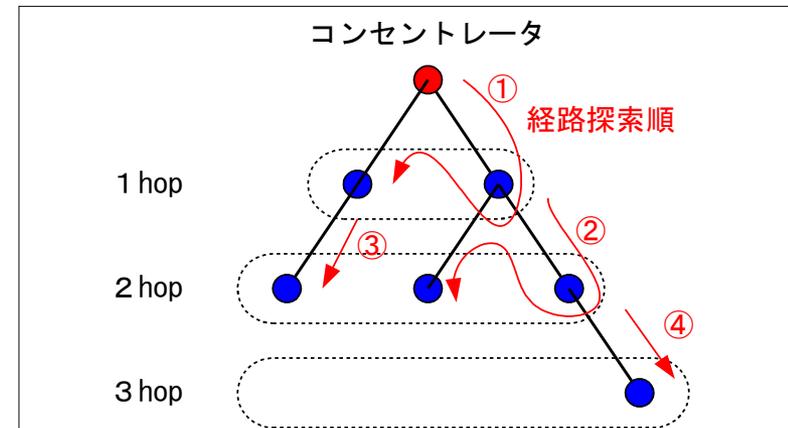
— 通信接続率の計算 —

- ・ノード間の距離が r 以下であれば、そのノード同士は直接通信できるとする。
- ・直接通信できないノードは、直接通信できるノードを経由して通信できるとする。
- ・平面上に N 個のノードと 1 個のコンセントレータがある場合、コンセントレータから通信できるノードの数を Q とすると、通信接続率は $P = Q / N$ であらわせる。
- ・一定領域内でノードをランダム配置し、コンセントレータから直接通信可能なノードを 1 ホップ目として、順次繰り返し経路を探索（シミュレーション）して、通信接続率 P を計算する。



全ノード数 : 13
接続ノード数 : 9
非接続ノード数 : 4
検針率
 $P = 9 / 13 = 0.69$

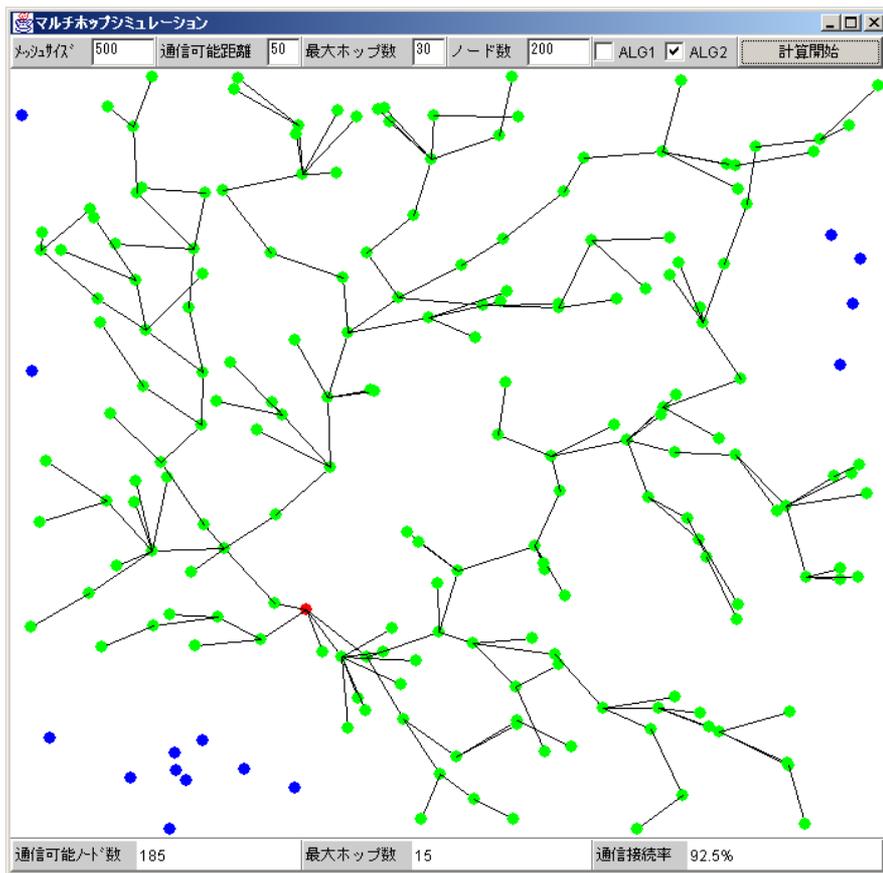
平面上に配置のドーナたれさ経路問題



ルーティングアルゴリズム

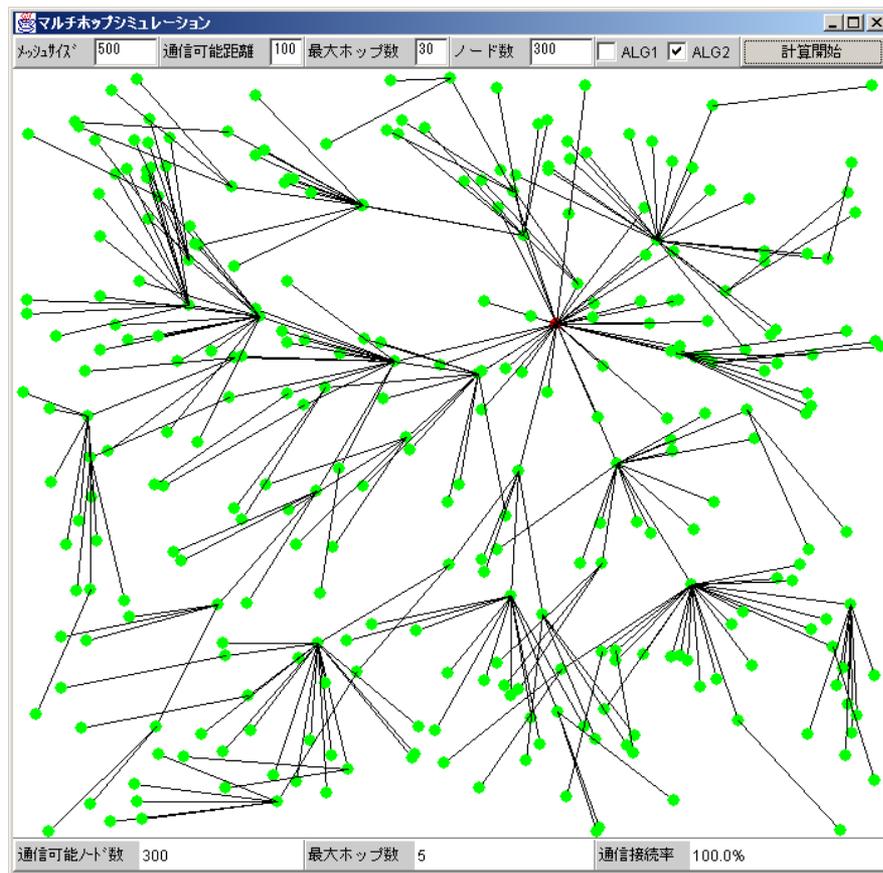
4. 通信接続率の予測手法

— マルチホップシミュレーション —



L:一辺の長さ R:通信可能距離 N:ノード数

シミュレーション画面 (L=500m,R=50m,N=200)



●:コンセントレータ ●:接続ノード ●:未接続ノード

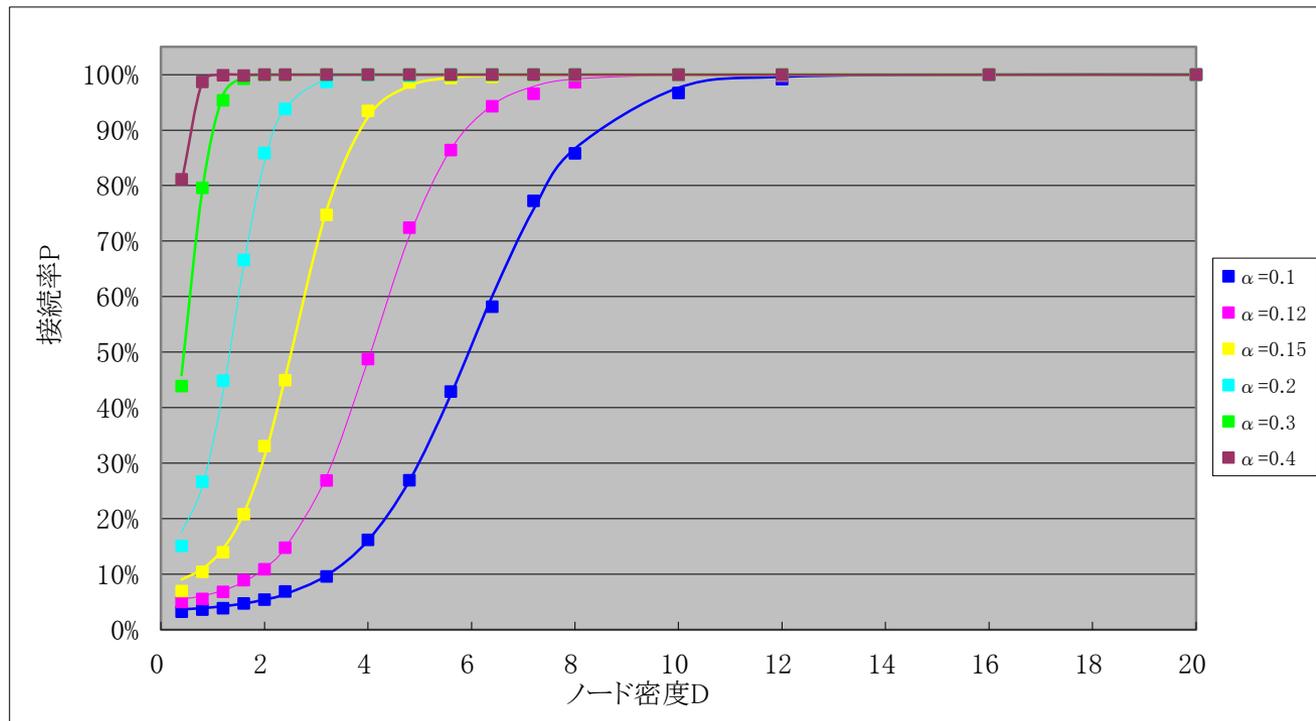
シミュレーション画面 (L=500m,R=100m,N=300)

4. 通信接続率の予測手法

— 通信接続率シミュレーション —

- $\alpha = R/S$ (α が小さいほど住宅密集地)
- ノード密度が小さいと接続率の増加率も小さいが、その後急激に接続率が増加し、100%に徐々に近づく。
- 近似式

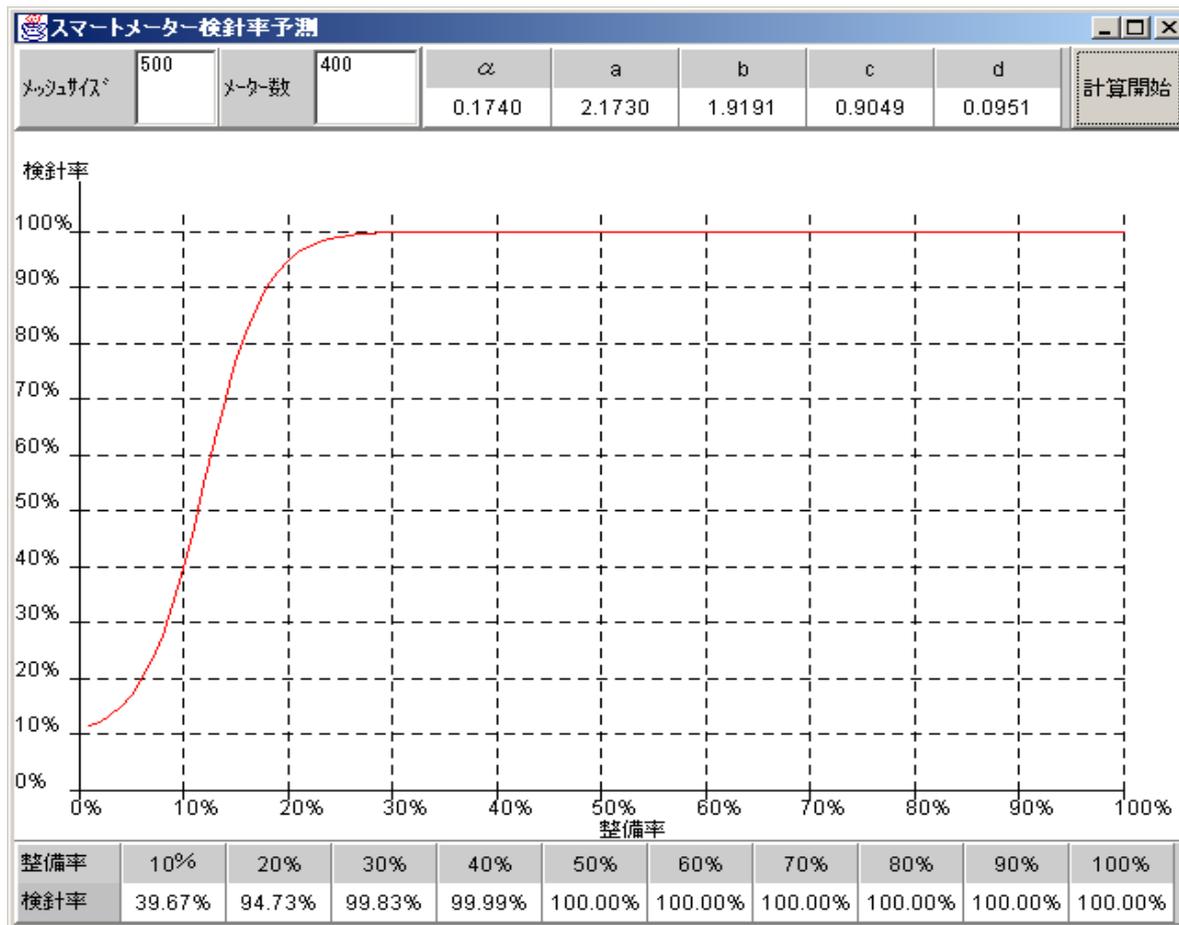
$$P(\alpha, D) = \frac{c(\alpha)}{1 + e^{-a(\alpha)(D-b(\alpha))}} + d(\alpha)$$



ノード密度と接続率の関係

4. 通信接続率の予測手法

— 通信接続率予測ツール —



通信接続率予測ツール

課題

- 実環境でのメーターの通信可能距離の精度（実測値の収集・分析）
- 計算エリア内で通信可能距離が一様でない。

スマートメーター—関連の今後の研究課題

- 広帯域通信方式の適用
 - 新サービスへの対応／高速PLC／無線LAN、、
- 不感地帯(島嶼部、山間部、地下)との通信手段
 - ユニバーサルサービス／配電線搬送／広域無線、、
- セキュリティ対策
 - 機器認証／暗号化／不正アクセス検知／、、
- 電力設備の設計・保守
 - 配電機器の最適配置／故障の予測、、
- 負荷平準への適用
 - 間接DR(Demand Response)／直接DR、、
- 分散電源の制御への適用
 - 商用電源との連携／発電量の調整、、
- 新サービスの提供
 - 見守り／防犯／ビックデータ、、

終 了

ご清聴ありがとうございました。