建物内における 920MHz 帯無線センサの受信電力と伝播距離 — IoT 時代を見据えて —

RESEARCH ON THE RECEIVED POWER AND THE PROPAGATION DISTANCE WITH 920 MHz BAND WIRELESS SENSORS IN THE BUILDING

横井佐代子 — * 1 宮下裕貴 — * 2
山根俊博 — * 3 白石理人 — * 3
國分 誠 — * 2

Sayoko YOKOI — * 1 Yuki MIYASHITA — * 2
Toshihiro YAMANE — * 3 Michihito SHIRAIISHI — * 3
Makoto KOKUBUN — * 2

キーワード：
IoT, 920MHz 帯, 無線センサ, 屋内環境電磁波,
レイトレーシング

Keywords:
IoT, 920MHz band, Wireless sensors, Indoor electromagnetic
environment, Ray tracing

The site attenuations and propagation distance of radio wave intensity with 920 MHz band wireless sensors in one building (office and conference room) were clarified by measuring. In the case of -70 dBm with lower limit of radio wave intensity, the propagation distances of the office and conference room are 6.4 m and 7.3 m, respectively. It is clear that the propagation distance becomes shorter due to partitions and humans. Moreover, we could simulate the measurement result using ray tracing method, which is shown that the method is effective to predict the spatial distribution of radio wave intensity.

1. はじめに

総務省¹⁾によれば、IoT (Internet of Things, 「モノのインターネット」) とは『様々な「モノ」がセンサと無線通信を介してインターネットの一部を構成すること』と定義される。また、『そのコンセプトは、自動車、家電、ロボット、施設などあらゆるモノがインターネットにつながり、情報のやり取りをすることで、モノのデータ化やそれに基づく自動化等が進展し、新たな付加価値を生み出すというものである。』とのことである。

一方、IoT が機能する前提としてセンサと無線通信の存在が必要不可欠であるが、建物内における電波の伝搬特性は十分検討されているとは言えない。これは、IoT を担う多くのセンサで使用されている 920MHz 帯の周波数が 2012 年 7 月から使用可能になったばかりで現在も移行時期である^{2,3)}ために、知見がまだ十分に蓄積されていないことが理由と考える。

我々は、建物内で IoT システムを実現させるために、様々な建物におけるセンサと無線通信機器の設置方法の知見 (無駄なく無理なく IoT を実現させるためには、いくつのセンサと無線通信機器が必要で、それらを施設内にどう配置すればよい) の蓄積を始めた^{4,5)}。その一環として、ある建物内の二種類の空間における 920MHz 帯の無線センサの受信電力の空間分布を計測することで、その受信可能な距離を明らかにしたので本稿で報告する。また、これらの空間について受信電力のシミュレーションを行うことより、計測結果を再現できるか試行した。920MHz 帯の無線センサの受信電力をどれだけ再現できるか調査することにより、計測できない空間や IoT 導入時の事前検討にシミュレーションが有効か確認するためである。

2. 検討対象とした空間

検討対象とした二種類の空間について、計測空間とシミュレーション空間に共通する事項を説明する。

- ・対象空間: 約 380m² (18m×21m) の空間 A (オフィスとして使用) と同規模の空間 B (会議室として使用)。
- ・共通点: 床と天井は金属製のデッキプレート、南東側は高透明熱線反射・断熱フィルム (電界遮蔽性 30dB) が貼られた強化ガラス、北東および南西の二面はスチール製の壁。
- ・相違点: 空間 A の北西側は、金属製の本棚が並んでいる。また、計測空間 A では、全体的に約 30 席の執務席が金属パーティションで区切られている。パーティションは、1 枚が 840mm×1,200mm×40mm (幅×高さ×厚さ) の鉄製の板 (クロスパネル, Okamura) である。空間 B の北西側は、スチール製の壁と金属製のドアである。また、パーティションはない。

3. 計測

3. 1 計測方法

(1) 計測ポイント

図 1 に計測領域と無線通信機器の配置の模式図を示す。

空間 A と空間 B に共通して、計測する領域は 17m×9m の長方形とした。この長方形の長方向を x 軸、短方向を y 軸とし、北東側の頂点を原点 (x, y) = (0, 0) とした。x 軸と y 軸を 1m 間隔に区切り、原点も含めて 18 点×10 点 (x 軸×y 軸) = 180 点の座標点を設け、これを計測ポイントとした (図 1 のメッシュの格子点)。なお、計測時に空間 A では約 30 人がパーティションに囲まれた自席で執務を行っていた。空間 B には、計測者 4 人以外の人はいなかった。

¹⁾ 清水建設株式会社 研究所 研究員・博士 (理学)
(〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

²⁾ 清水建設株式会社 研究所 研究員・修士 (工学)

³⁾ 清水建設株式会社 主任研究員・博士 (工学)

¹⁾ Researcher, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Ph.D. (Sci)

²⁾ Researcher, Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.

³⁾ Senior Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

表 1 計測に使用した無線通信機器

用途	製品名および特徴
送信機	EnOcean GmbH 製 温度センサ STM431J 周波数 928.35MHz、送信出力 1mW、ヘリカルアンテナ
受信機	EnOcean GmbH 製 受信用 USB モジュール USB400J パターンアンテナ (ホイップアンテナをプリント基板上に埋め込んだもの)
解析用可視化ツール	EnOcean GmbH 製 Dolphin View Advanced

写真 1 無線通信機器

図 1 計測領域と無線通信機器の配置

(2) 計測機器

計測で使用した無線通信機器類を表 1 に示す。送信機は空間 A および空間 B それぞれの原点の高さ FL+1m に紙製の支柱で固定した (写真 1 (a) 「送信機」)。一方、受信機は各計測ポイントを移動させ、各ポイントで受信電力を 7 回測定した。受信機の設置高さも FL+1m とし、机のない場所を計測する場合には受信機を台車に固定し (写真 1 (a))、計測ポイントの直上に机がある場合にはスタイロフォームに受信機を固定した (写真 1 (b))。受信電力は、受信機をノートパソコンの USB ポートに接続し、解析用可視化ツールで表示させた。計測では受信機内のアンテナが垂直になるように固定した (写真 1 「送信機」)。

(3) 計測値の処理と図化

計測により得られた受信電力は、受信電力の対数値 P_1 [dBm]なので、①式に基づき線形値 P_2 [mW]に換算した。

$$P_2 \text{ [mW]} = 10^{(P_1[\text{dBm}]/10)} \cdots \text{①式}$$

次に、7 つの計測値から最大値と最小値を 1 つづ除外し、残り 5 つの計測値から平均値を算出した。各計測ポイントの計測値の平均値を①式に基づき再び対数値 P_1' [dBm]に変換し、コンター図を作成した。空間 A での受信電力の空間分布を図 2 (a) に、空間 B の空間分布を図 2 (b) に示す。

3. 2 計測値の再現性

今回の計測値の再現性について考察する。図 2 (a) と図 2 (b) は、1 計測ポイントにつき 7 つの計測値から最大値と最小値を除外した 5 つの計測値 (以下、「中央五値」とする) の平均値として算出した受信電力である。最大値と最小値を除外したのは外れ値による影響を防ぐためであり、平均値を算出するのに中央五値を使ったのは計測値の品質評価に耐えるデータ群にするためである。しかし、最大値と最小値が本当に外れ値であるか確かめたわけではなく、中央五値も計測値として使用するに妥当なものか検証したわけではない。そこで、計測値について簡単な検証を行い、品質を評価することにした。ここで、受信電力は正規分布に従うと仮定し、中央五値から母集団を推測した。そして計測値が母集団の 95% (=平均値 $\pm 2\sigma$ (σ :標準偏差))に入るか検定し、入らなかった割合を表 2 に示した。

各空間の計測値の最大値は全部で 180 個である。このうち、例えば、空間 B では 82 個が平均値+ 2σ より大きかった。よって、計測値が母集団 (有意水準 5%) に入らなかった割合は $82 \div 180 \times 100 = 45.6\%$ となる (表 2)。これは、5% 有意水準の両側検定の右側で棄却されたことになり、母集団からみて出現確率の極めて小さな値 (=外れ値) が 45.6% 含まれていたということである。同様に、空間 A、空間 B のいずれにおいても最大値と最小値に一定の外れ値が入っていることが示された。よって、「1 つの計測ポイントにつき、7 つの計測値を取り、平均値を出すにあたっては最大値と最小値を除外したものを使う」というやり方は信頼性のあるデータを得る方法として妥当と思われる。同様に、中央五値は 0.0% だった。これは、中央五値に外れ値が含まれておらず、母集団から推定して出現確率が妥当な値であることを意味する。これを、再現性のある値と解釈すると、今回の計測で得られた結果 (図 2 (a) と図 2 (b) の平均値) は再現性のあるデータ群から得られた信頼できる値と考える。

表 2 計測値が母集団 (有意水準 5%) に入らなかった割合

	空間 A	空間 B
最大値 [%]	30.6	45.6
中央五値 [%]	0.0	0.0
最小値 [%]	23.9	30.0

3. 3 結果と考察

空間 A と空間 B (図 2 (a)、図 2 (b)) 共に、送信機から較正点にかけて受信強度の距離減衰の傾向が見られた。また、局所的に受信電力が低い場所も複数みられた。両空間とも計測領域が反射体で

図2 計測とシミュレーションにおける受信電力の空間分布

表3 受信電力の下限と受信距離 (=半径)

受信電力の 下限 [dBm]	空間 A 受信距離[m]		空間 B 受信距離[m]	
	計測	シミュレーション	計測	シミュレーション
-50	2.0	1.0	1.4	1.2
-60	3.2	1.9	2.0	1.5
-70	6.4	4.3	7.3	6.9

囲まれていることから、干渉性フェージングが起きていると考える。

空間 A の計測結果から、ある値以上の電力強度を受信できる領域を円の半径として読み取った。例えば、無線通信機器の受信電力の下限を-70dBm と仮定すると、送信機からみて-70dBm 以下となる一番近い計測ポイントの座標 (x [m], y [m]) は (5, 4) であった (図 2 (a))。よって、送信機から同ポイントまでの距離 (以下、「受信距離」とする) は約 6.4m となる。送信機から半径約 6.4m 以内の領域であれば、送信機から-70dBm 以上の電力を受信できるという意味である。同様に、空間 B での計測ポイントの座標 (x, y) は (2, 7) となり、-70dBm の受信距離は約 7.3m となった (図 2 (b))。送信機を円の中心、これらの受信距離を半径とする円弧を図 2 (a) と図 2 (b) に青い太線で示した。空間 B より空間 A の方が、受信距離が約 12 % ($6.4 \div 7.3 \times 100 = 87.6\%$) 短くなった。さらに、受信電力の下限をそれぞれ-50dBm、および-60dBm としたときの両空間における受信距離を図 2 から求め、-70dBm の結果と共に表 3 にまと

めた。この両空間の主な違いは、電波の反射面であるパーティションの有無である。パーティションが多く存在する空間 A では送信機の近傍においても反射などの影響により局所的に受信電力が著しく低下する場合があります、結果的に保証される受信距離が短くなることが確認された。

4. シミュレーション

4. 1 計算方法

(1) 計算モデル

空間 A および空間 B について、電波の反射体と吸収体を抽出し、シミュレーションのモデルを作成した (図 2 (a) と図 2 (b) の太い黒線と点線)。なお、このモデルは空間を真上から見た平面図であるが、実際は高さ方向の形状も再現した三次元空間となっている。それぞれのモデルにおいて、太い黒線は空間を真上から見た時の電波の反射面であり、これに加え天井と床も反射面とした。空間 A の電波の吸収面は、点線で示した。

(2) 計算手法とパラメータ

幾何光学的手法に基づいたレイトレーシング法による電磁環境シミュレーションシステム『屋内電磁環境シミュレータ』^{6,7)}を使用し、計測空間の電界強度を理論的に推定した。シミュレーションのパラメータを表 4 に示す。計算時間やシミュレーションに用意されている設定などを考慮し、可変パラメータとしてレイの放射間隔を 2 種類、反射回数を 12 種類、空間分解能を 2 種類とした (回折の効

表4 シミュレーションのパラメータ

種類	設定値
送信出力	1 mW
周波数	928.35 MHz
偏波面	垂直偏波
指向性	なし
レイの放射間隔	2°、4°（球面放射）
反射回数	1、2、3、4、5、6、8、9、10、15、20、25 回
空間分解能	1m 間隔、0.1m 間隔

表5 較正点での電力値と較正值（＝比）

	空間 A	空間 B
計測値 [dBm]	-62.0	-67.3
シミュレーション値 [dBm]	-84.9	-102.3
比（計測・シミュレーション）[dB]	22.9	35.0

果、及びアンテナの指向性はなしとした)。これらをすべて組み合わせると 48 通りのシミュレーションの条件ができる。これらの条件の下でシミュレーションを行い、空間 A および空間 B についてそれぞれ 48 通りの結果を得た。その結果、レイの放射間隔が 2°、反射回数が 5 回、空間分解能が 0.1m 間隔の条件の時に計測結果をよく再現できた（送信出力、周波数、偏波面、指向性はすべての計算に共通なので省略）。

なお、受信機はホイップアンテナ^{8,9)}なので水平方向には無指向性と考えられる。一方で、送信機はその形状からヘリカルアンテナ（写真 1（c））なので水平方向の指向性があると推測されるが、仕様書などでその特性が公表されているわけではない。レイトレーシング法における電界強度解析法ではアンテナの指向性が重要な要因となるが、今回は無指向の条件でどの程度再現できるかを検討した。

(3) 計算結果の処理および図化

シミュレーションの結果は、電界強度 E [dBμV/m] で出力される⁹⁾。計測値（図 2（a）と図 2（b））は電力値 P [dBm] で表示されているため、両者を比較できるようにシミュレーションで得られた数値を下記の要領で単位変換した。

$$P[\text{dBm}] = E[\text{dB}\mu\text{V/m}] - c + d \cdots \textcircled{2}$$

ここで、 c は単位変換の値、 d はアンテナファクターとする。今回の場合、50Ω 系の計測機器であることから $c = 107$ 、 $d = 0$ （較正するため）とした。

次に、送信点から一番遠い計測ポイントを「較正点」とし、その座標（17、9）の電力値（図 2（a）および図 2（b））の計算結果とシミュレーション結果の比（表 5 参照）で較正を行った。具体的には、空間 A における較正点での計測値とシミュレーション値の電力値の比は 22.9 なので、シミュレーションで得られた各点の電力値に 22.9 を足し合わせた。空間 B も同様に、各点の電力値に 35.0 を足し合わせた。上記の処理で得られた較正後のシミュレーションの電力値をコンター表示した。そして、シミュレーションが計測を再現できているかは、送信機から較正点の方向に大まかな受信電力の距離減衰がみられるか、フェージングの空間分布（局所的に受信電力の値が小さい場所）が再現できているかの 2 点から判断した。なお、空間

A と空間 B の較正值（比）の差異が大きいため空間的な位相合成の影響も考えられる。電波暗室での計測値と自由空間でのシミュレーション値から較正值の理論データを算出し、表 5 に示した較正值と比較することにより妥当性を評価することで較正の厳密性が増すと思われるので、今後の課題としたい。

4. 2 結果と考察

計算結果をコンター表示したものを図 2（c）と図 2（d）に示す。空間 A および空間 B において、送信機から較正点に向かって大まかに受信強度の距離減衰の傾向、および干渉性フェージングの傾向がみられた。また、空間 A ではパーティションの配置に沿うように受信電力の空間分布が見られ、計測の 10 倍の分解能でシミュレートした効果がでていいると思われる。

シミュレーションは、計測を再現できたかについて考察する。計測の時と同じく、受信電力と受信距離の関係を図 2（c）と図 2（d）から読み取り、表 3 の「シミュレーション」に示した。空間 B においては、計測とシミュレーションの差は 0.5m 以下だった。計測が 1m 間隔で行われたことを考慮すると、シミュレーションは計測をよく再現したと判断した。一方、空間 A では、どの受信電力の下限値に対してもシミュレーションよりも計測による受信距離の方が 1m 以上長くなり、空間 B ほど再現性は良くなかった。この理由として、シミュレーションの条件の簡略化（電波の吸収体としての人の存在を考慮しなかったこと、あるいは什器、床、パーティションなどの反射係数の簡略化）が考えられる。空間 B よりも複雑な系なので、条件の簡略化によって実測とシミュレーションの差が大きくなったと考える。

また、本シミュレーションにおいて、空間 A と空間 B の違いはパーティションの有無なので、例えば、受信電力 -70dBm における両空間の受信距離の差 $6.9 - 4.3 = 2.6\text{m}$ はパーティションにより生じたものであると言える（表 3）。概して、パーティションの存在は、電波の受信距離を短くさせることが確認できた。

5. 議論

温湿度センサ STM431 の仕様書によれば、電波の受信距離は廊下で 30m、ホールで 100m とある¹⁰⁾。しかし、この受信距離を決定した条件（受信強度）は仕様書に記されておらず、電波が十分受信できるのか、かろうじて受信できるかを判断するのは難しい。そこで今回、無線センサの配置計画を行うことを想定し、独自に計測を行うことによって実空間における受信強度の空間分布を得たと同時に、受信強度の数値と電波の受信状況の情報を経験的に取得することができた。また、空間 A のようにパーティションや人によって受信電力の空間分布が影響を受けることが示唆されたので、今後は、人の密度やパーティションの配置の仕方によって受信電力がどのように変わるかなど調査し、さらに知見を蓄積していく予定である。

6. まとめ

本稿では、建物内において 920MHz 帯無線センサの受信電力の空間分布を計測により明らかにした。パーティションなどの反射体が多く存在するオフィス空間では局所的に受信電力が低下するポイントが存在するため、電波的な障害物が少ない会議室に比べ、保証で

きる無線の受信距離が短くなることが確認された。また、レイトレーシング法によるシミュレーションでは、計測結果をよく再現できることが分かった。これより、計測できない建物や IoT 導入時の事前検討においては、シミュレーションによる 920MHz 帯無線センサの受信電力の推定が有効であることが確認された。

参考文献

- 1) 総務省：ICT 化の進展がもたらす経済構造の変化，平成 27 年版 情報通信白書のポイント
<http://www.soumu.go.jp/johosusintokei/whitepaper/ja/h27/pdf/n5400000.pdf>
- 2) 総務省：「920MHz 帯電子タグシステム等に関する技術的条件」の審議について http://www.soumu.go.jp/main_content/000104164.pdf
- 3) 萩野達雄：920MHz 帯特定小電力無線のあらし，RF ワールド，CQ 出版，2014
- 4) 山崎元明，廣瀬啓一，白石理人：IoT の施設内活用に向けた検討，平成 27 年電気設備学会全国大会，F-1，pp.302-303，2015
- 5) 雨宮沙耶，廣瀬啓一：快適な室内環境構築に向けた IoT 活用に関する取り組み，建築設備と配管工事 8 月増刊号特集「建築設備の快適性」，744，vol.55，No.10，pp.63-66，2017
- 6) 沼田茂生，佐藤博一：RC 造建物内での無線 LAN 通信実験と解析-幾何光学的シミュレーションによる解析-日本建築学会 2002 年度大会学術講演梗概集，D-1，環境工学I，pp.1139 -1140，2002
- 7) 清水建設株式会社技術研究所：屋内電磁環境シミュレータ 取扱説明書，2001
- 8) EnOcean：USER MANUAL USB Gateway USB 400J，2017
- 9) EnOcean：DATA SHEET USB Gateway USB 400J，2017
- 10) EnOcean：USER MANUAL Scavenger Transmitter Module STM 431J/435J，2014

[2017 年 10 月 4 日原稿受理 2018 年 2 月 6 日採用決定]