

空間伝送型ワイヤレス電力伝送に対応した 電波伝搬シミュレーションの開発

山口 晃治^{*1}・花澤 理宏^{*1}・林 俊光^{*2}・遠藤 哲夫^{*1}
本間 幸洋^{*3}・須賀 良介^{*4}・橋本 修^{*4}

Keywords : Beam wireless power transmission systems, ray tracing simulation, leakage electromagnetic field, data of radio wave characteristics
空間伝送型ワイヤレス電力伝送, レイトレース法, 漏えい電磁界, 電波特性データ

1. はじめに

空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム（以下、空間伝送型 WPT）は、電波を使用して電力を送電する技術であり、設備機器を配線レスで設置してバッテリー交換が不要になるため、利便性の観点から社会実装への期待が高まっている。ユースケースの一つとして、図-1に示すようにサービスロボットに送電装置を搭載して、壁や天井の設備機器への給電が提案されている¹⁾。令和4年5月には、電波法施行規則等の一部を改正する省令が施行され、周波数 920MHz 帯、2.4GHz 帯および 5.7GHz 帯の 3 バンドが制度化され²⁾、将来的には 24GHz 帯が追加されることが検討されている。ただし、現状の利用範囲は屋内に限定されており、外壁に必要な透過減衰量として、例えば、5.7GHz 帯では-16dB が定められていることが、普及に向けての障壁になっている。利用範囲が屋内に限定されている理由は、空間伝送型 WPT が携帯電話等の無線通信に比べて送信電力が大きいため、利用環境外への漏えい電磁界による他の無線局（5.7GHz 帯では、無線 LAN、ドローンおよび ETC 等）との共存が課題となるためである。今後の普及に向けて、他の無線局との共存性評価のための建物外漏えい電磁界のシミュレーションの精緻化が重要である。精緻なシミュレーションが実現できれば、建築部材による建物外への漏えい電磁界を計算して、他の無線局との共存性評価が可能となると共に、建物外への漏えい電磁界が大きい建築部材の対策検討が可能となる。

* 1 技術センター 先進技術開発部 次世代建設技術開発室
* 2 技術センター イノベーション戦略部 技術開発戦略室

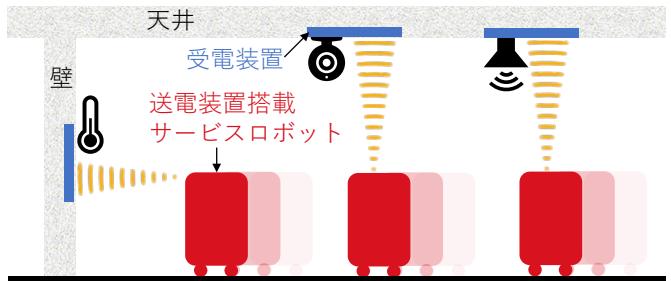


図-1 サービスロボットによる WPT イメージ

Fig.1 Image of WPT using service robots

建物外漏えい電磁界をシミュレーションする解析手法には、レイトレース法が広く用いられている。レイトレース法は、空間伝送型 WPT の周波数帯において建物規模の電波伝搬シミュレーションが可能であるが、電波が入射する建築部材の透過減衰量および反射減衰量（以下、透過減衰量と反射減衰量を併せて電波特性と呼ぶ）が計算精度に大きく影響することが報告されている³⁾。実際の建物に利用される建築部材は、単一部材ではなく複数の部材の集合体である。例えば、鉄筋コンクリートは、金属体である鉄筋と誘電体であるコンクリートで構成されており、コンクリートのみで構成した部材の電波特性は、内部に鉄筋を有する鉄筋コンクリートの電波特性と全く異なる値となる。しかし、建物を構成する建築部材の電波特性を評価するには数メートルサイズの実大試験体を製作する必要がある。さらに、建築部材の透過減衰量よりも高い性能を有するシールド室を用いた測定を行わないと正確な透過減衰量の評価が行えない。このため、現実に即した

* 3 三菱電機（株）

* 4 青山学院大学

電波特性データベースの整備が進んでおらず、公開されている情報が限られていた。

そこで、本研究では、数メートルサイズの建築部材を実際に即した施工法によって製作し、電波暗室において測定した電波特性の測定値に基づくシミュレーション用データベースについて検討する。また、空間伝送型WPTのうち5.7GHz帯を対象として建築部材の電波特性データを実建物で使用している各建築部材へ適用し、高精度な電波伝搬シミュレーション法を提案する。そして、本提案法で解析したシミュレーション結果と同条件で実験した測定結果との比較から精度検証を行い、その妥当性を示す。

2. 建築部材の電波特性データ

2.1 電波特性データの測定方法

建築物に利用する建築部材と同一の部材、構造、形状の建築部材を製作し、図-2に示す大成建設技術センター電磁環境実験室の送信室および受信室において電波特性を測定した。送受信室は100dB仕様シールドドームであり、壁床天井に電波吸収体を設置することで、測定時の定在波を抑制できる仕様である。また、送信室と受信室間には縦2m×横3mの開口があり、実大の建築部材を取付け可能である。

透過減衰量は、挿入損失法によって測定する⁴⁾。挿入損失法では、図-2の測定系において、試験体取り付け開口に試験体を設置しない状態の受信レベルL_{t0}と、試験体を設置した状態の受信レベルL_{t1}の差を透過減衰量とする。試験体取付け開口から送信アンテナの距離は4m、高さ2m(試験体開口中心)とする。一方、受信アンテナと試験体取付け開口中央の離隔距離は2.3mとし、受信アンテナは試験体開口を中心に0.2m間隔で横方向11点(2m)、縦方向7点(1.2m)を格子状に移動し、計77点を測定する。

反射減衰量は、タイム・ドメイン法によって測定する⁵⁾。図-3にアーチ架台を用いた反射減衰量の測定概要を示す。アーチ架台に送受信アンテナを取り付け、送受信アンテナから試験体面までの距離が2mになる位置に固定する。この際、入射角θは5度から45度とする。銅箔で構成された基準値用試験体の受信レベルL_{r0}と、建築部材の試験体を設置した際の受信レベルL_{r1}との差を反射減衰量とする。

建築部材の代表例として、建物外壁等に用いられる軽量気泡コンクリートALC(以下、ALC)と熱線反

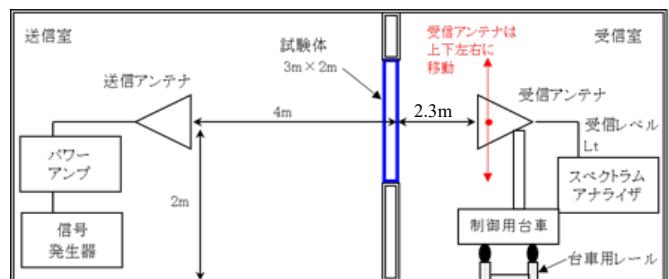


図-2 透過減衰量測定概要（立面）

Fig.2 Measurement overview of transmission loss

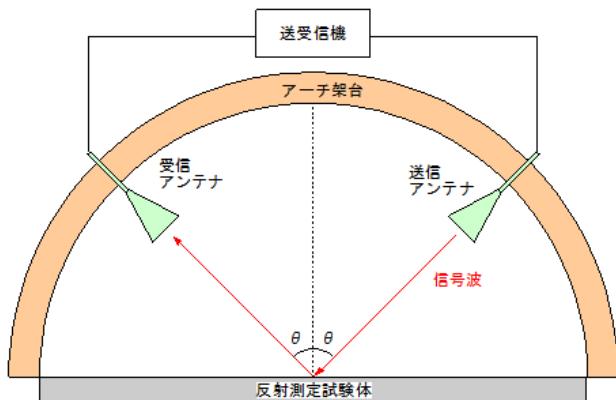


図-3 反射減衰量測定概要（平面）

Fig.3 Measurement overview of reflection loss

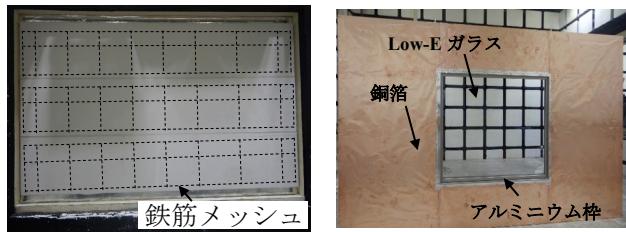
射ガラスLow-E(以下、Low-E)の5.7GHzにおける電波特性データを示す。

ALCの試験体を写真-1(1)に示す。試験体は、2.9m×0.6m×厚さ0.1mのパネル3枚を横張りした構造である。パネルの材質は、コンクリート内に気泡を含ませた軽量気泡コンクリートである。内部には補強材として鉄筋が配筋されており、鉄筋メッシュと軽量気泡コンクリートの多層構造となっている。

Low-Eの試験体を写真-1(2)に示す。試験体は、1.2m×1.2mのアルミニウム枠にLow-Eガラスを設置した構造である。なお、Low-Eガラスは、フロートガラスにLow-E膜と呼ばれる金属膜(酸化錫や銀)をスパッタリングによってコーティングしたガラスである⁶⁾。

2.2 電波特性データの測定結果

ALCの透過減衰量を面分布として、水平偏波TMと垂直偏波TEの結果を図-4(1)に示す。結果から、筋状に電波が漏えいしている傾向となった。3枚のパネルの接続部には鉄筋メッシュが配置されておらず、軽量気泡コンクリートのみであることが受信アンテナの位置による透過減衰量に影響したものと考えられる。図-4(2)にLow-Eの透過減衰量の測定結果を示す。太枠はアル

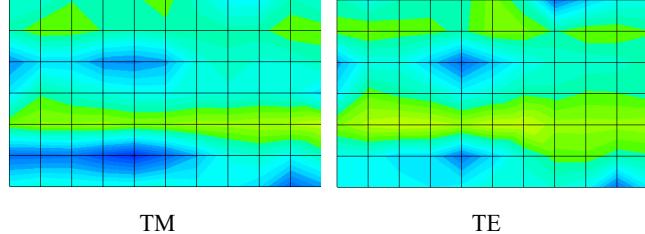


(1) ALC

(2) Low-E

写真-1 建築部材試験体

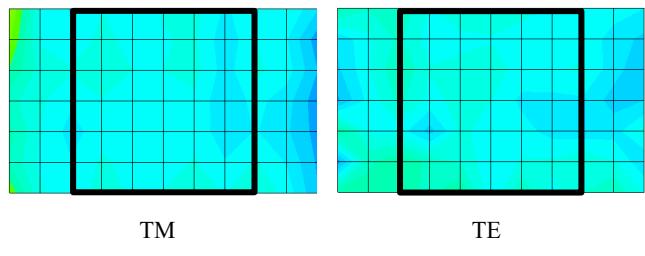
Photo.1 Building component test body



TM

TE

(1) ALC



TM

TE

(2) Low-E

図-4 透過減衰量面分布

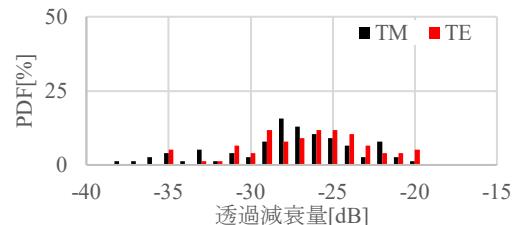
Fig.4 Area distribution of transmission loss

ミニウム枠の位置であり、ALC に比べて、受信アンテナの位置によるレベル差がなく全体的に透過減衰量が低い（電波が抜けにくい）傾向となった。透過減衰量の面分布を確率密度関数 PDF(Probability Density Function)に変換した結果を図-5 に示す。ALC の透過減衰量が-38dB から-20dB であるのに対して、Low-E は-31dB から-26dB であり、受信アンテナの位置による透過減衰量の差異が少ない傾向になることが確認された。損失最小値⁷⁾に相当する 90% 値は、ALC の TM が-21dB、TE が-22dB、Low-E の TM が-27dB、TE が-26dB であった。

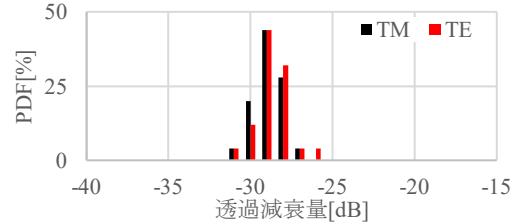
図-6 に ALC および Low-E の反射減衰量の測定結果を示す。ALC は、0 度から 45 度の入射角において-12dB から-22dB であるのに対し、Low-E は-5dB 以上であり、基準値用試験体である銅箔に近い傾向となった。

2.3 電波特性データ化手法

実測した建築部材の電波特性（透過減衰量・反射減



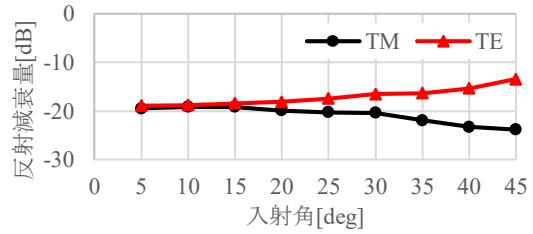
(1) ALC



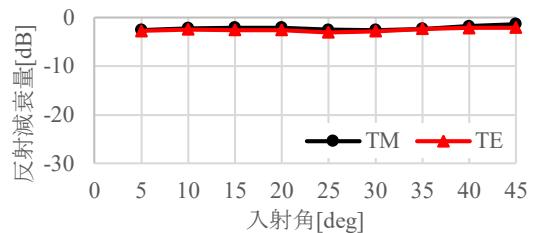
(2) Low-E

図-5 透過減衰量出現頻度

Fig.5 PDF of transmission loss



(1) ALC



(2) Low-E

図-6 反射減衰量測定結果

Fig.6 Measurement results of reflection loss

衰量) を利用して推定する複素比誘電率を式(1)とし、各パラメータ—a,b,c,d を以下の手順で推定する⁸⁾。

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' = a \times f^b - c \times f^d \quad (1)$$

- ① 任意の複素比誘電率によって透過減衰量を計算
式(1)に示す複素比誘電率の実数部($a \times f^b$)を 1 から 10、複素比誘電率の虚数部($c \times f^d$)のパラメーター—c を 0 から 109、パラメーター—d を-1 から 0 と仮定し、それぞれ 0.01 ずつ変化させ、透過減衰量計算値を算出する。
- ② 透過減衰量計算値と測定値の比較
①の方法で算出した透過減衰量計算値と測定値

(度数分布の上位 90%値) を比較し、任意の誤差範囲内となるパラメーターc,dを複数推定する。

③ パラメーターc,dの決定

②の方法で推定した実数部とパラメーターc,dによって各周波数(0.92MHz, 2.4GHz, 5.7GHz, 24GHz)の反射減衰量計算値を算出し、測定値との相関関数が最大となる組み合わせを、パラメーターc,dとして決定する。

④ パラメーターa,bの決定

複素比誘電率の実数部のパラメーターaを1から100、bを-0.01から-1.0と仮定し、それぞれ0.01ずつ変化させることで算出される反射減衰量計算値と測定値との相関関数が最大となる組み合わせを、パラメーターa,bとして決定する。

⑤ 電波特性の算出

これにより、測定のみでは把握が困難な電波特性の角度特性に対応した電波特性データベースを整備することが可能になる。ただし、建築部材の目地やスリットの影響によってTEとTMの透過減衰量が異なる建築部材があるため、複素比誘電率は、TEとTMで別々に推定し、電波特性の角度特性を算出する。

上記の方法で推定したALCとLow-Eの複素比誘電率を表-1に示す。また、複素比誘電率より算出したALCとLow-Eの角度特性を図-7に示す。両試験体とも透過減衰量0度入射時および反射減衰量5度から45度入射時は測定値と概ね同等であった。3章以降において本手法の妥当性を検証する。

3. 電波伝搬シミュレーション解析

3.1 解析モデル

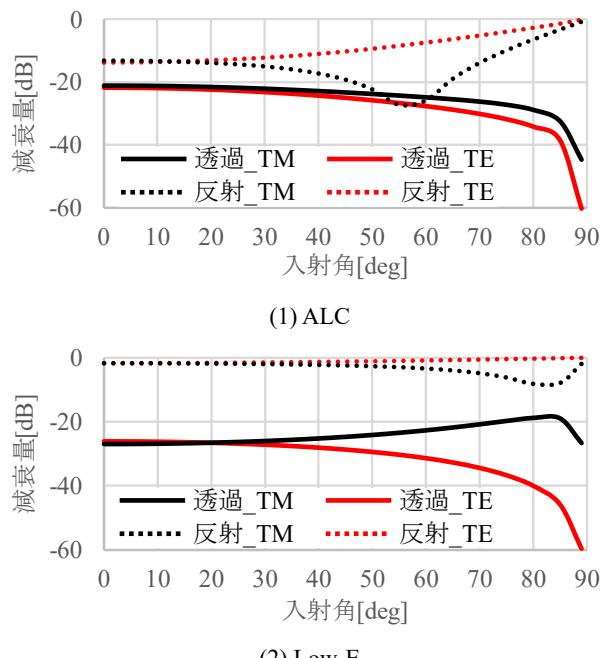
解析対象とする建物は、大成建設技術センター内のZEB(Net Zero Energy Building)実証棟およびその周辺建物とする。シミュレーションの解析モデルを図-8に示す。解析モデルの生成方法は、図面情報に沿って外装や内装の寸法、配置、部材等、実際に近い構成でモデル化する。モデル化に際し、ZEB実証棟の建築部材として実使用され、当該モデルにも適用する外壁の主な建築部材を表-2に示す。各建築部材の電波特性は、2章で示した方法で整備したデータベース⁹⁾¹⁰⁾を参照した。

図-9に主な建築部材の配置をZEB実証棟のワイヤーフレームモデル上に面で示す。ZEB実証棟の外装は太陽光を室内へ取り込み、かつ壁面の太陽光パネルで発電する技術が実装されており、南西側には熱線反射ガ

表-1 複素比誘電率

Table 1 Complex relative permittivity

試験体	TM		TE	
	実数部	虚数部	実数部	虚数部
ALC	2.37	0.62	2.17	0.61
Low-E	10.00	60.94	10.01	56.89



(1) ALC

(2) Low-E

図-7 角度特性

Fig.7 Angle characteristic

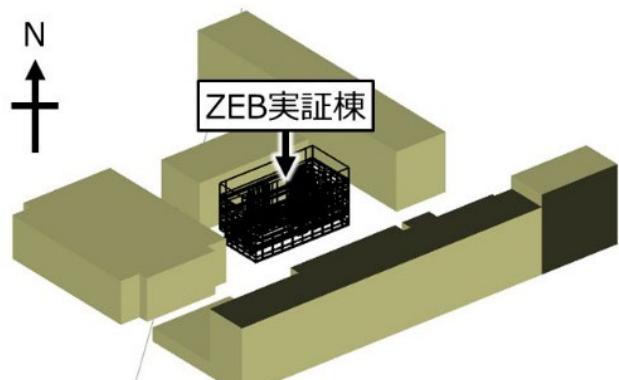


図-8 解析モデル

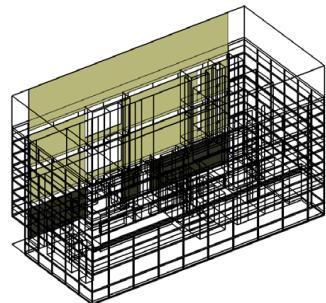
Fig.8 Simulation model

ラスのLow-Eと金属パネル(太陽光パネルを代用)が交互に配置し、また建物の角の一部には熱線反射ガラスの金属膜が配置している。なお、ZEB実証棟以外の周囲建物等については、外壁全面を金属パネルで簡易的にモデル化する。

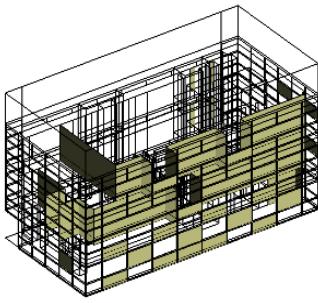
表-2 外壁の主要建築部材

Table 2 List of main building materials for exterior walls

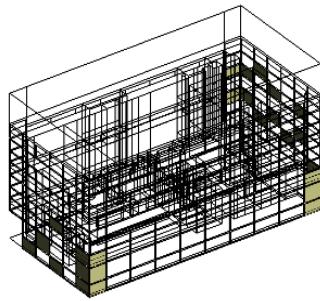
建築部材	透過減衰量[dB]	
	TM	TE
軽量気泡コンクリート ALC	-21	-22
熱線反射ガラス Low-E	-27	-26
熱線反射ガラス金属膜	-5	-4
金属パネル	-42	-73



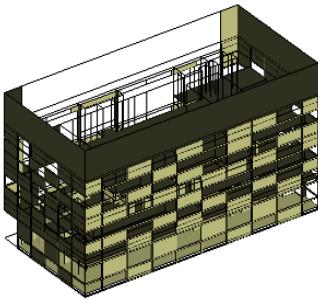
(1) ALC



(2) Low-E



(3) 金属膜



(4) 金属パネル

図-9 外壁の主要建築部材配置

Fig.9 Arrangement of main building components of exterior walls

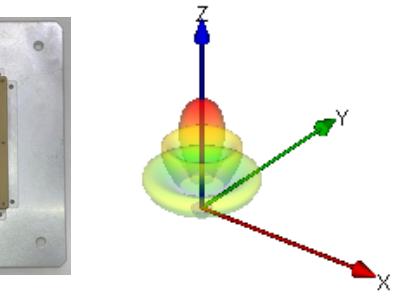
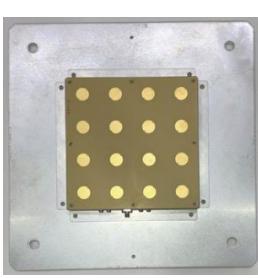
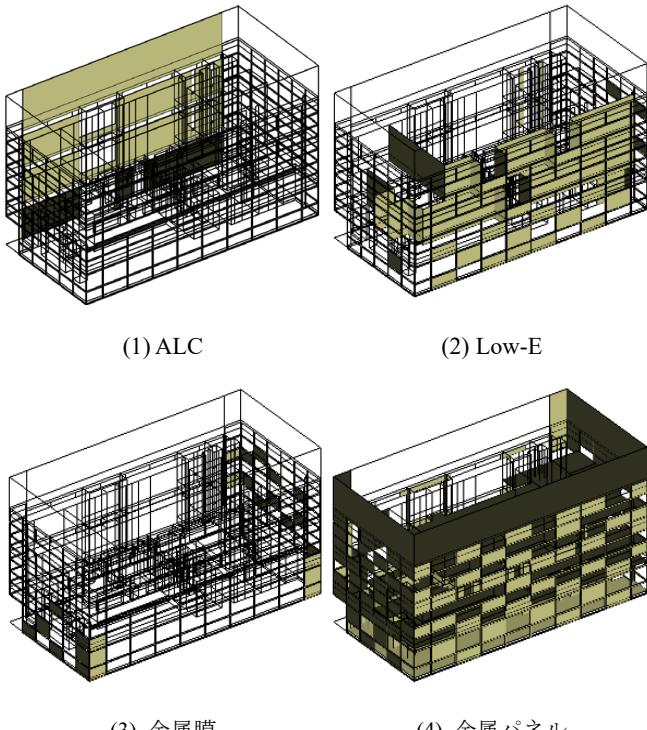
3.2 解析条件

シミュレーション解析では、レイトレース法の内、ライアンチング法の計算アルゴリズムを有する市販シミュレータ(Remcom 社の Wireless InSite®)を使用する。シミュレーション諸元を表-3 に示す。アンテナについては、4 章の測定でも使用する 5.7GHz 空間伝送型 WPT 送電用の 16 素子円形パッチアレーインテナ(三菱電機製試作機⁹⁾)を送信、受信用バイコニカルアンテナ(A-info 製 SZ-2002650/P)を受信として、図-10 に示す 3 次元指向性データをシミュレーション解析に入力する。送信方向は、天井より壁への送信が建物外への漏えい電磁界が大きくなると考えられるために、ZEB 実証棟の南西側とする。送信アンテナは床の仕上げ面から 1.3m の高さで設置する。なお、解析では会議室の什器(机や椅子)はモデルから除外して解析する。

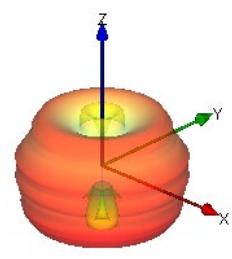
表-3 解析条件(シミュレーション諸元)

Table 3 Simulation conditions

解析周波数	5.75GHz
送信電力	10dBm
送信波(光線出射)角度間隔	0.1deg
最大反射回数	6
最大回折回数	1
最大透過回数	4



(a) 送信アンテナ



(b) 受信アンテナ

図-10 アンテナ指向性

Fig.10 Antenna directivity

3.3 解析結果

ZEB 実証棟の建物 1 階全体(約 14×30m)および建物外における床の仕上げ面から 1.3m の高さの漏えい電磁界分布を図-11 に示す。なお、建物内、外の境界を明示するために建物外形を実線で付記する。建物内では送信アンテナ(Tx)の最大指向方向である正面(建物下方向)に大きい電力が分布している。しかし、建物外で最も大きい電力は建物左下方向であった。図-9 に示すように、建物下方向は金属パネルと Low-E が交互に配置している。一方、建物左下方向では、熱線反射ガラス金属膜が配置している。同じ熱線反射ガラスでも、表-2 に示すように、Low-E の透過損失は-26dB に対して金属膜は-4dB であり、金属膜から建物外へ伝搬しやすくなっている。シミュレーションによる本結果の妥当性を検証するため、4 章では同条件下で測定値との比較検討を行う。

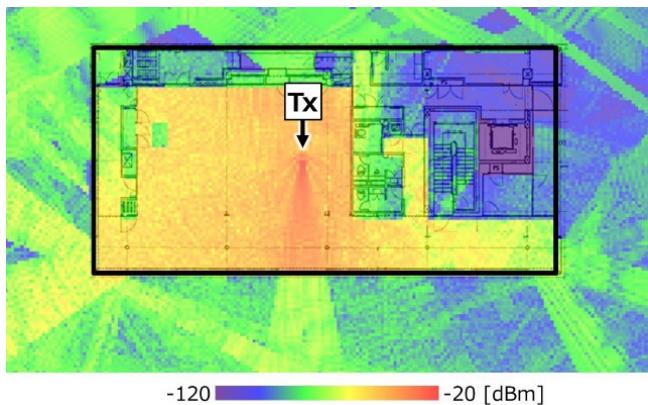


図-11 解析結果

Fig.11 Simulation results

4. シミュレーション解析精度検証

4.1 電波伝搬測定

図-12 に送受信アンテナの配置を示す。測定では、図-10 に示す送信および受信アンテナを使用し、3 章のシミュレーション解析条件と合わせ、送信アンテナ(TX)は建物 1 階に設置し、最大指向方向を建物下方向へ向け、受信アンテナ(RX)は図-12 の青丸位置を測定点として設置する。測定点は、シミュレーションの解析結果を参考に建物外漏えいが大きい建物下方向および左方向を 1m 間隔、それ以外を 2m 間隔とする。なお、建物外壁からの離隔距離は、周囲の造作物(人工池等)を避けて、建物上方向を約 3m、それ以外を約 6m の位置で測定する。

測定では、標準信号発生器(Agilent 製 E8257D)の無変調波を発生させて、接続する送信アンテナから 10mW で送信する。一方、受信アンテナはスペクトラムアナライザ(R&S 製 FSV3030)を接続し、受信レベルを測定する。なお、各測定点で受信アンテナの設置方向を変えることで、垂直偏波、水平偏波(2 方向)の各偏波を測定する。

4.2 シミュレーション解析精度検証

シミュレーションの受信アンテナが 1 点では、測定点との位置ずれが生じる。そこで、解析精度の検証を行うにあたり、シミュレーションでは、図-13 に示すように、受信アンテナを測定点中心に、 $100 \times 100\text{mm}$ の範囲を 10mm 間隔で 121 点を解析し、受信レベルの累積分布関数 90% 値をシミュレーションの値(以下、計算値)と定める。各測定点の測定値と計算値をプロットしたグラフを図-14 に示す。図-14 の斜め実線は測定値

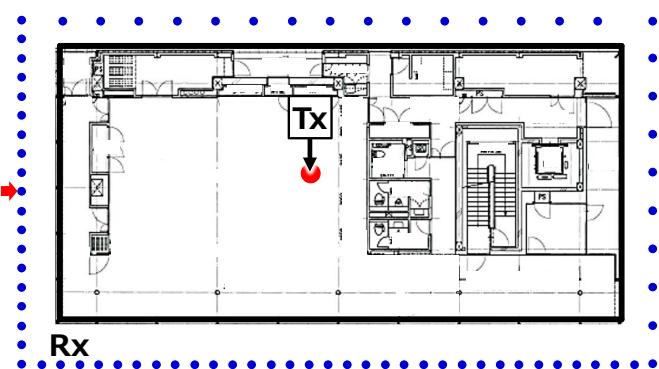


図-12 送受信アンテナ配置

Fig.12 Transmitting and receiving antenna positions

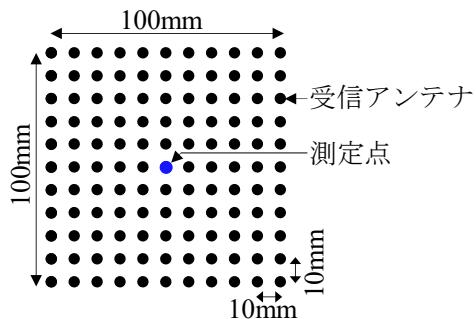


図-13 測定点における受信アンテナ配置

Fig.13 Receiving antenna positions at measurement point

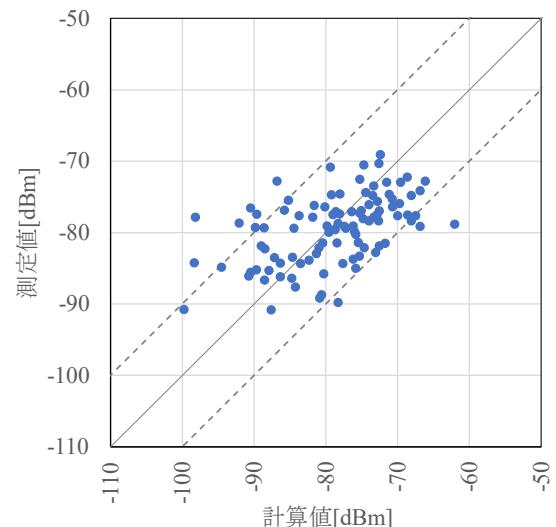


図-14 測定値と計算値の比較

Fig.14 Comparison of measured and calculated values

と計算値の差分が 0dB、破線は差分 $\pm 10\text{dB}$ のガイド線である。差分 $\pm 10\text{dB}$ 以内を 1 つの評価指標とすると、測定値と計算値は 89% が一致した。また、測定値の最大値は、図-12 の建物左方向の赤矢印であり、その測定値は -69dBm であった。同位置の計算値は -72dBm で、

3dB の差で一致することを確認した。なお、送電アンテナの最大指向方向に対する測定値は-74dB、計算値は-67dBm であり、7dB の差であった。以上から、電波特性データベースを用いることで、精緻なシミュレーション解析が可能であり、測定値との精度検証から本手法が妥当なことを確認した。

5. まとめ

本研究では、測定データに基づく建築部材の電波特性データベースを適用したシミュレーション解析手法を提案し、実建物でのシミュレーション解析による計算値と電波伝搬測定による測定値の比較から精度検証を行った。その結果、計算値と測定値の差分±10dB 以内を評価指標とした場合、建物外で 89% の一致を確認でき、本手法による解析の妥当性を示した。これにより、空間伝送型 WPT の導入に伴う、他の無線局との共存性評価や建物外漏えいが最大となる位置の特定等、提案した本手法により精緻なシミュレーション解析が可能なことを明らかにした。

今後は、本研究で対象とした 5.7GHz 以外の空間伝送型 WPT の周波数(920MHz, 2.4GHz, 24GHz)についても検討を進める予定である。

謝辞

本研究は、総務省の「電波資源拡大のための研究開発(JPJ000254)」における委託研究「空間伝送型ワイヤレス電力伝送の干渉抑制・高度化技術に関する研究開発」により実

施した成果の一部である。

参考文献

- 1) 本間幸洋, 佐々木拓郎, 田中俊行, 高橋利成, 濱口響, 大原啓, 遠藤哲夫, 山口晃治, 林俊光, 花澤理宏, “空間伝送型ワイヤレス電力伝送における電波伝搬推定に関する検討－その4 建物内ワイヤレス電力伝送システムの実証試験,” 信学技報, vol.124, no.357, EST2024-114, pp.111-115, 2025.
- 2) 総務省, “電波法施行規則等の一部を改正する省令(令和4年総務省令第38号),” 総務省省令 2022.5.26.
- 3) 遠藤哲夫, “医療施設における電磁環境計画技術の開発,” クリーンテクノロジー22号, pp.65-69, 2012.
- 4) 日本建築学会環境基準, “建築物の現場における電磁シールド性能測定方法規準・同解説,” 2017.2.
- 5) 森孝幸, 渡辺宅治, “タイム・ドメイン機能による電波吸収体の反射減衰量の測定,” 信学論 B-II, Vol.J73-B-II, No.2, pp.124-126, 1990.
- 6) 矢尾板和也, “建築用高性能 Low-E ガラスの開発,” 旭硝子研究報告, vol.65, pp.2-4, 2015.
- 7) 総務省, “情報通信審議会 諮問第 2043 号「空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの技術的条件」のうち、構内における空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの技術的条件,” pp.217-219, 2020.7.
- 8) 遠藤哲夫, 吉野涼二, 寺田矩芳, 東山潤司, “屋内電波環境推定のための一般建築材料の透過反射特性に関する実験的検討,” 日本建築学会環境系論文集, pp.71-78, 2005.
- 9) 山口晃治, 崎原孫周, 遠藤哲夫, 須賀良介, 増子佑基, 橋本修, “空間伝送型ワイヤレス電力伝送を利用する建築物の漏えい電磁界評価に関する検討－その 2 電波特性データベース,” 信学技報, vol.123, no.445, EMCJ2023-105, pp.7-12, 2024.
- 10) 山口晃治, 花澤理宏, 林俊光, 遠藤哲夫, 本間幸洋, 須賀良介, 橋本修, “空間伝送型ワイヤレス電力伝送における電波伝搬推定に関する検討－その 1 建築部材の電波特性データベース,” 信学技報, vol.124, no.357, EST2024-111, pp.95-100, 2025.