

発電プラント内の無線ネットワーク構築に向けた RC 壁透過波の利用可能性に関する検討

A feasibility study of the transmission radio wave over the reinforced concrete structure in the buildings of power plants for wireless network

(株)日立製作所	佐藤 義人	Yoshihito SATO	会員
(株)日立製作所	山田 勉	Tsutomu YAMADA	非会員
(株)日立製作所	里見 弘久	Hirohisa SATOMI	非会員
(株)日立製作所	大場 希美	Nozomi OHBA	非会員
(株)日立製作所	遠藤 久	Hisashi Endo	会員

Abstract

If the wireless communication is feasible in the concrete structure of power plants, it is effective for us to reduce the construction cost, improve the placement of equipment and change facilities easily. In buildings of such a power plant, the reinforced concrete (RC) walls might be more than one meter in thickness, with high rebar density. Therefore, radio wave transmission over this kind of concrete walls was studied to discuss feasibility. Aperture parts of walls, such as doors, whose thickness is less than transmission distances, are considered by the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) calculations, and experiments with the similar structure in the actual building. As a result of the calculations and the experiments, we confirmed that the transmission radio wave over the RC structure would be feasible with lower frequency and vertically placed dipole antenna.

Keywords: power plant, wireless network, RC wall, transmission radio wave, FDTD

1. まえがき

スマートシティや道路交通情報システム、スマートフォンやタブレット端末のモバイル通信環境など、現在の社会インフラではさまざまな無線システムが利用されている。工業設備などでも無線通信システムを導入することで、敷設コストの低減、設置自由度の向上、設備拡充が容易などのメリットがある。このように無線システムの必要性は増大しており、その設計技術が重要となる。近年では、発電プラント内でも、監視、保守、制御に至るまで無線ネットワークの利用が進められようとしている。導入障壁は、セキュリティ面や、通信の安定性等が挙げられるが、その他にも、発電プラント建屋内では、耐震、耐圧のために高い強度が必要であり、特に低層階では、1m オーダーの厚みで、高密度で太い鉄筋が入った鉄筋コンクリート (RC) 壁が用いられる。このような壁面では、電磁波に対する透過損失が大きく、無線通信に対し大きな障壁となる。一般にコンクリート材質は、無

線通信に広く用いられるマイクロ波帯の周波数では、比誘電率 5~7、導電率 0.002~0.1[S/m]程度の損失性の電気的特性^{[1][2]}を持ち、RC 壁による透過減衰は、免許不要で広く用いられる 2400MHz 帯では、1m あたり 100dB 程度にもなると推定される。このような通信規格における送信電力は、日本では 10~20dBm 程度であるが、最低受信感度は-80~-90dBm 程度となるため、RC 壁の減衰だけで 100dB になると、ほぼ通信不能となる。また、金属扉は電磁波に対して完全遮蔽体となるため、このような鉄筋コンクリートと金属扉で仕切られたエリア間では無線通信ネットワークを構築することは困難である。

2. 壁面透過波の利用可能性評価

2.1 壁面透過波の利用

このように、無線が遮蔽されたエリア間で通信が必要な場合、RC 壁に貫通口を通し、有線の通信ネットワークを敷設することが一般的である。しかし、特に既設の発電プラントでは、新たに貫通口を構築することは大掛かりな工事となってしまう、現実的でない。

連絡先:佐藤義人、〒319-1292 茨城県日立市大みか町
7-1-1、(株)日立製作所研究開発グループ、
E-mail: Yoshihito.sato.wp@hitachi.com

一方で、RC 壁の厚みがたとえ 1m あっても、扉の存在する部分は、RC 壁の開口部となる。金属扉であれば、RC 壁よりも薄くとも、同程度の強度を確保することは容易なため、金属扉は、RC 壁の開口部の厚み方向に対して、一部のみをふさぐ形となる。開口部分をすべて金属板で補強するような構造でなければ、RC 壁の厚みよりも短い壁内の透過経路が確保でき、透過減衰も小さくなり、通信の可能性がある。

本研究では、この点に着目して電磁界シミュレーションにより RC 壁の透過特性を検査し、RC 壁と金属扉のある施設において、確認実験を行った。

以下では、このような構造を RC 壁+金属扉構造と呼ぶものとする。

2.2 電磁界シミュレーションによる透過率評価

(1) 解析方式および解析ソフトウェア

本研究では、アンテナと、RC 壁および金属扉が波長に対して近接して配置された空間を解析するため、マクスウェル方程式の直接解析手法の一つである FDTD 法を用いる。ここでは、市販の FDTD 法解析ソフトウェア (EEM-FDM^[3]) を用いた。

(2) 解析モデル

Fig. 1 にシミュレーションモデルを示す。1.0m の RC 壁と、0.3m の金属扉を模擬したモデルである。幅 3.0m、高さ 2.5m、厚み 1.0m の RC 壁の中心に幅 1.0m 高さ 2.0m の開口部を設け、RC 壁の片方に面を合わせて幅 1.0m、高さ 2.0m、厚さ 0.3m の金属扉を配置している。なお、鉄筋は透過率を評価するために影響のある個所 1.0m×1.0m の範囲のみに配置した。鉄筋は、実際の発電プラントの構造を参考にして 3.8×10^3 m 径、0.2m ピッチとし、コンクリート表面から 0.1m の深さとした。また、コンクリートの電気的特性は、比誘電率 6.9、比透磁率 1.0、導電率 0.096[S/m]とし、金属扉および鉄筋は完全導体とした。

(3) 解析周波数

解析に用いる周波数は、980MHz、2400MHz、5000MHz の 3 つの周波数とする。周波数毎に波長(それぞれ約 0.3m、0.12m、0.06m) の 1/10 サイズを基本として空間メッシュを生成し、コンクリート部分は波長短縮効果(真空中の波長の約 40%)を考慮して短縮波長の 1/5、アンテナ中央に配置する給電点付近 2 メッシュ分は波長の 1/50 でさらに細分した。また、総使用メモリを GPU 計算で使用可能な 1GB (計算に使用したビデオボードの VRAM 容量) 以下とするため、解析空間サイズを調整し、980MHz、2400MHz、5000MHz のそれぞれで、3.0m×3.0m×2.5m、

3.0m×3.0m×1.5m、1.0m×1.6m×1.0m とした。吸収境界条件は PML(Berenger's Perfectly Matched Layer)とした。

(4) アンテナ配置

アンテナ配置は、コンクリート開口部の金属扉付近の yz 平面内で、 $3 \times 3 = 9$ か所の位置について計算を行う。半波長ダイポールアンテナとし、給電点は、Fig. 2 のように配置する。○は水平方向、△は垂直方向にアンテナ導体を配置する。導体の端点から金属扉までの距離が同じとなる位置をインデックス (I_y , I_z) で表す。

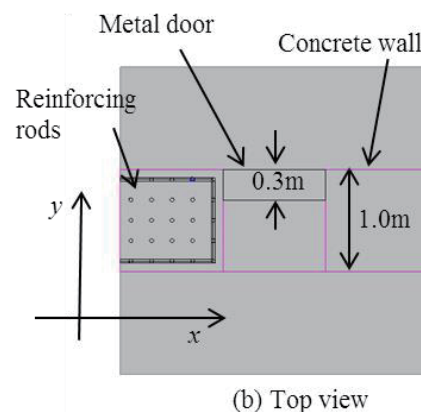
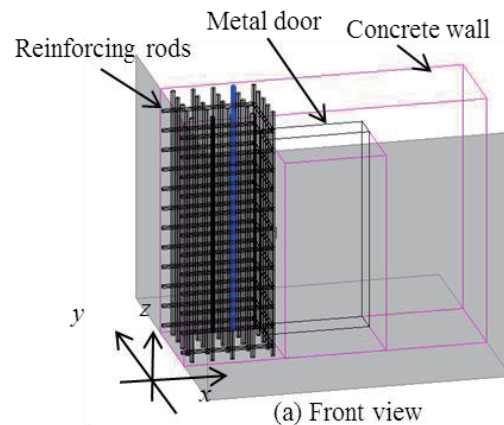


Fig. 1 FDTD simulation model

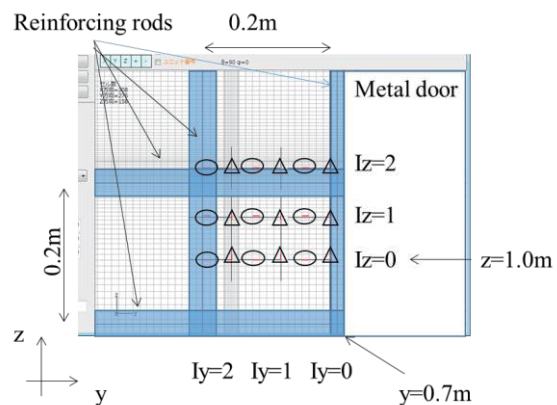


Fig. 2 Antenna element and feeding point

(5) 評価方法

RC 壁の有無による透過率を評価するため、同じアンテナ位置で構造物の無い場合の計算も行い、構造物による損失量を評価する。

Fig. 3 に、評価エリアを示す。アンテナ位置から RC 壁を介した空間内の $1.0\text{m} \times 0.1\text{m} \times 1.0\text{m}$ のエリアとする。評価エリア内の電界強度分布を調べ、鉄筋コンクリートおよび金属扉の有無、アンテナ方向・位置による減衰量の違いを評価する。

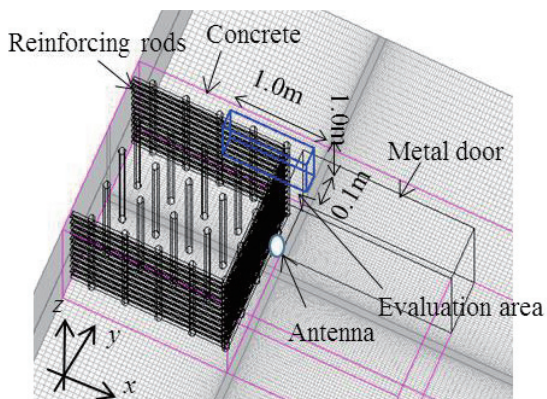


Fig. 3 Evaluation area

2.4 RC 壁+金属扉構造における確認実験

(1) 測定場所

測定は地下2階にある無響室の前室にて実験を行った。Fig. 4 は、無響室の概略配置図である。前室は厚さ 0.3m の RC 壁で囲まれ、厚さ 0.05m の金属扉で通路部と仕切られている。金属扉の隣は、厚さが 0.7m の鉄筋コンクリート柱となっており、発電プラント内の RC 壁+金属扉構造に類似すると考えた。

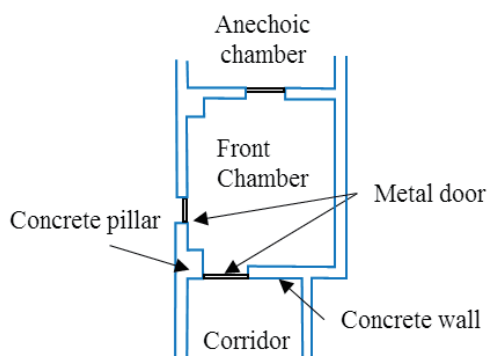


Fig. 4 Top view of the anechoic chamber

(2) 測定機材

測定には、市販の Wi-Fi アクセスポイント (コンテック製 DS-540APDM/STDM, IEEE80.2.11g/a 準拠)^[4] を用いた。親機 (AP と呼ぶ)、子機 (ST と呼ぶ) を 1 対用いて、無線機から得られる RSSI (Received Signal Strength

Indicator) の値を測定した。送信電力は、 100mW/CH (実測値) とし、周波数は 2412MHz を用いた。アンテナは半波長ダイポールアンテナである。

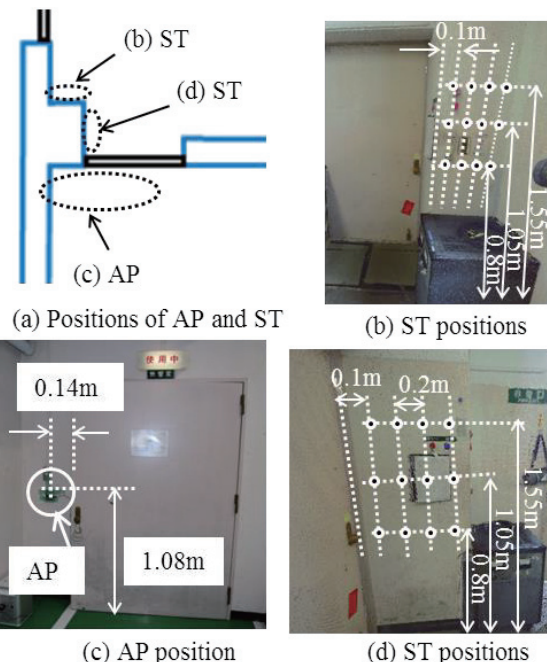


Fig. 5 Positions of AP and STs

(3) 測定方法

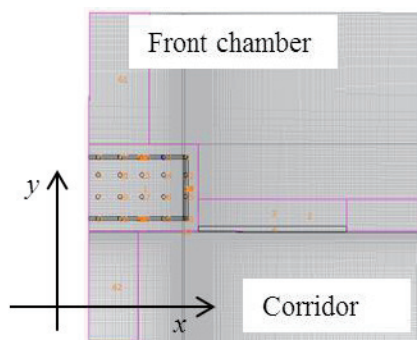
Fig. 5 は、測定場所を示す図である。Fig. 5 (a) は、Fig. 4 の金属扉付近を拡大した図である。破線の丸で囲んだ箇所は、それぞれ Fig. 5 (b)、(c)、(d) に示す場所である。Fig. 5 (c) は AP の設置場所であり、金属扉から 0.14m 離れ、高さ 1.08m の位置にコンクリート柱に密着して固定した。Fig. 5 (b)、(d) は ST の位置を示す。Fig. 5 (b) は、AP 設置面に対し、コンクリート柱を挟んだ反対側の面、Fig. 5 (d) は AP 設置面に直交した方向の面である。ST 位置は、高さ 0.8m 、 1.05m 、 1.55m とし、(c) の面では柱の端から 0.1m ピッチで 12 点、(d) 面では、金属扉から 0.1m 離れた位置から 0.2m ピッチで 12 点とした。各 ST 位置において、AP との間の RSSI を測定した。

(4) 比較用シミュレーションモデル

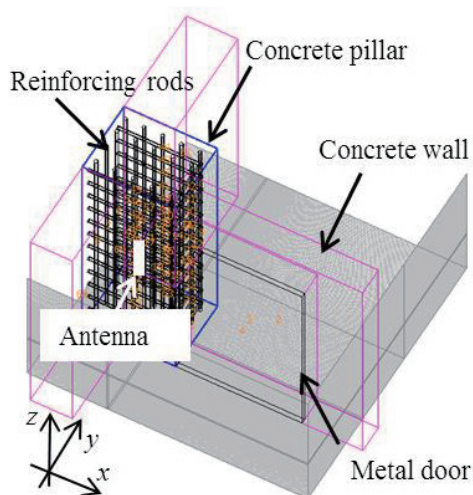
Fig. 6 は、実測の環境に合わせて作成した FDTD モデルである。Fig. 6 (a) は FDTD モデルの上面図で、Fig. 6 (b) は同斜視図である。コンクリート柱、金属扉等のサイズを計測し、RC 壁+金属扉構造をモデル化した。

また、コンクリート素材の導電率は、発電プラントを模擬した値 ($\sigma=0.0960[\text{S/m}]$) に加え、一般的なコンクリート素材の材質特性幅のうち低い方の値である $\sigma=0.0023[\text{S/m}]$ と、その間の 3 点 ($\sigma=0.0800$ 、 0.0500 、

0.0100[S/m])の5種類で計算を行った。導電率は、コンクリート密度や含水量等により、幅を持つため、複数の値を設定して比較するものとした。



(a) Top view



(b) Perspective view

Fig. 6 FDTD simulation model of front chamber

3. 結果

3.1 シミュレーションによる透過率評価結果

Fig. 7~Fig. 9に、それぞれ980MHz、2400MHz、5000MHzにおけるシミュレーション結果の一部(3/108パターン)を示す。各図とも上面図であり、電界強度[dBV/m]を濃淡によるコンター図で示している。

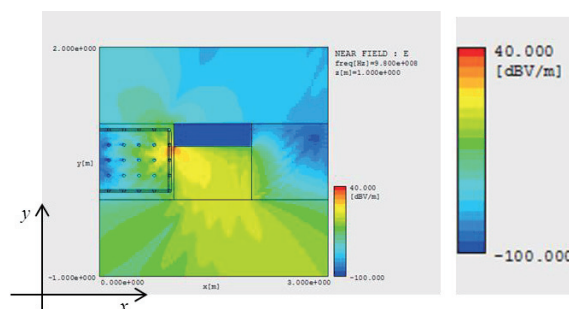


Fig. 7 Electric field strength on 980MHz

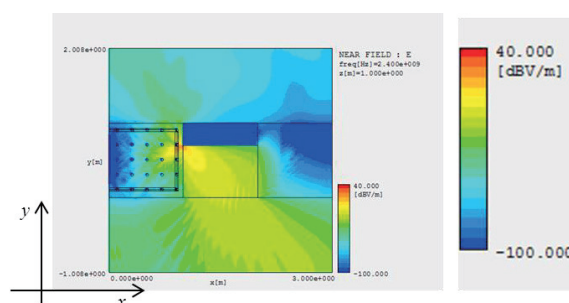


Fig. 8 Electric field strength on 2400MHz

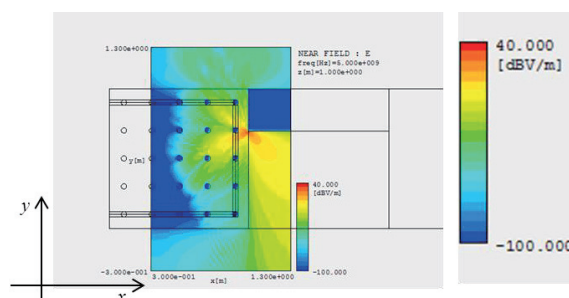
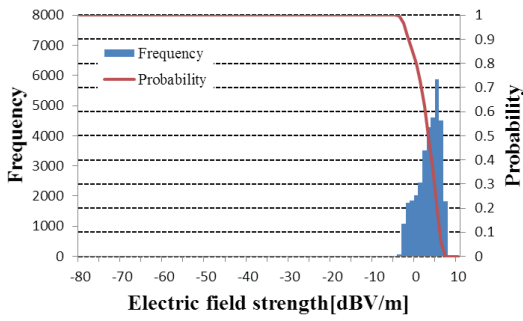
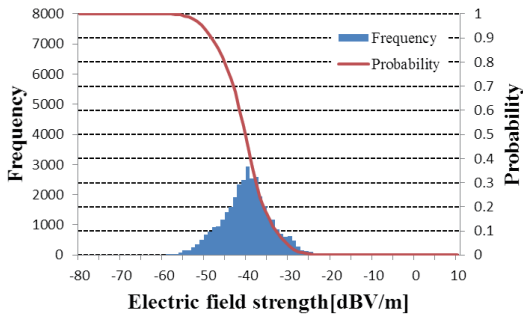


Fig. 9 Electric field strength on 5000MHz

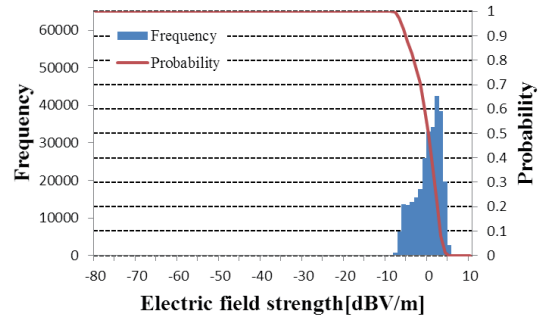
Fig. 10~Fig. 12は、Fig. 3に示した評価エリア内の電界強度分布をヒストグラムで表した図である。縦棒は横軸の電界強度値の度数を表し、左側の軸の値で表す。折れ線は右側の軸の値で表し、評価エリア内で横軸の電界強度以上となる体積比を表す。なお、周波数が高いほどメッシュサイズが小さくなるため、度数は大きくなる。



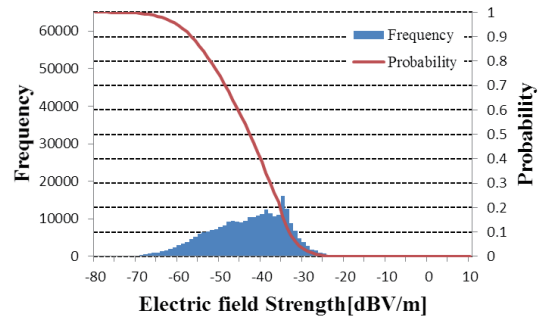
(a) 980MHz, Vert., w/o objects



(b) 980MHz, Vert., with objects



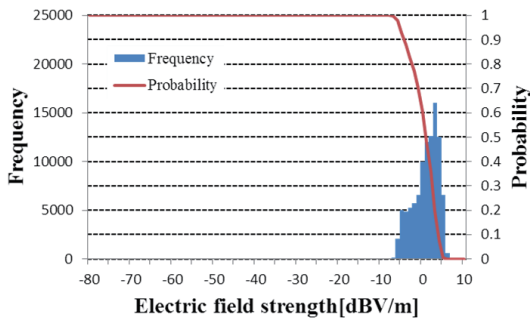
(a) 5000MHz, Vert., w/o objects



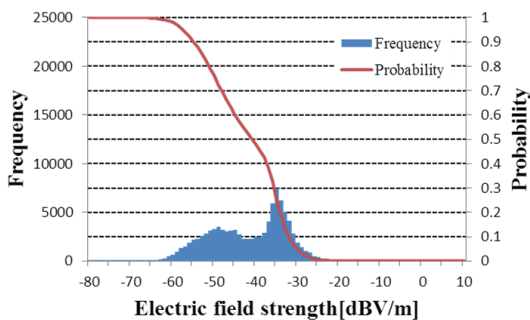
(b) 5000MHz, Vert., with objects

Fig. 10 Histograms of electric field strength in case of free space and in case of objects (980MHz)

Fig. 12 Histograms of electric field strength in case of free space and in case of objects (5000MHz)



(a) 2400MHz, Vert., w/o objects



(b) 2400MHz, Vert., with objects

Fig. 11 Histograms of electric field strength in case of free space and in case of objects (2400MHz)

Table 1 Estimated electric field strength and insertion loss

	Horiz.					
	E90[dBV/m](w/o obj)			$\Delta E90$ (w obj - w/o obj)[dB]		
	980MHz					
Iy=0	-11.8	-11.8	-11.8	-40.9	-41.9	-40.9
Iy=1	-11.8	-11.8	-11.9	-44.0	-45.2	-44.2
Iy=2	-13.8	-13.8	-13.9	-40.7	-41.0	-41.1
	2400MHz					
Iy=0	-15.2	-15.2	-15.3	-38.5	-39.1	-40.0
Iy=1	-18.0	-18.0	-18.1	-45.4	-47.8	-49.0
Iy=2	-20.5	-20.5	-20.6	-44.5	-46.7	-47.9
	5000MHz					
Iy=0	-16.8	-16.8	-16.8	-44.5	-45.9	-48.8
Iy=1	-19.7	-19.7	-19.7	-66.4	-65.4	-74.0
Iy=2	-22.1	-22.1	-22.0	-75.2	-74.1	-85.7
Iz=0	Iz=1	Iz=2	Iz=0	Iz=1	Iz=2	
	Vert.					
	E90[dBV/m](w/o obj)			$\Delta E90$ (w obj - w/o obj)[dB]		
	980MHz					
Iy=0	-1.8	-4.2	-4.4	-46.8	-49.6	-50.3
Iy=1	-1.8	-4.3	-4.3	-47.3	-48.1	-48.9
Iy=2	-1.9	-4.3	-4.6	-46.8	-48.3	-49.8
	2400MHz					
Iy=0	-4.4	-4.0	-4.5	-50.5	-48.5	-49.6
Iy=1	-4.3	-3.9	-4.3	-52.6	-53.4	-53.0
Iy=2	-4.4	-3.9	-4.3	-55.8	-56.8	-56.3
	5000MHz					
Iy=0	-5.5	-5.6	-4.9	-51.3	-53.9	-56.1
Iy=1	-5.3	-5.4	-4.7	-74.6	-70.2	-76.4
Iy=2	-5.5	-5.5	-4.6	-88.5	-85.7	-85.9
Iz=0	Iz=1	Iz=2	Iz=0	Iz=1	Iz=2	

Table 1 は、構造物が無い状態で、Fig. 3 の評価エリア内の90%が、その値以上となる電界強度値 E90[dBV/m](w/o obj)と、構造物がある場合との差分 $\Delta E90$ を示している。上半分はアンテナ導体が水平の場合 (Horiz.)、下半分は垂直の場合 (Vert.)、Iy、Iz は、Fig. 2 に示したアンテナ位

置を示すインデックスであり、 I_y が小さいほど金属扉に近く、 I_z が小さいほど高さが低いことを示す。 $(I_y, I_z)=(0, 0)$ が金属扉に最も近く、低い場所である。

3.2 RC 壁+金属扉構造における確認実験結果およびシミュレーション結果

Fig.13 は、無響室前室の実験を模擬した FDTD シミュレーションの結果による電界強度値を、濃淡で示した図である。解析空間を水平にスライスした断面における値を示している。

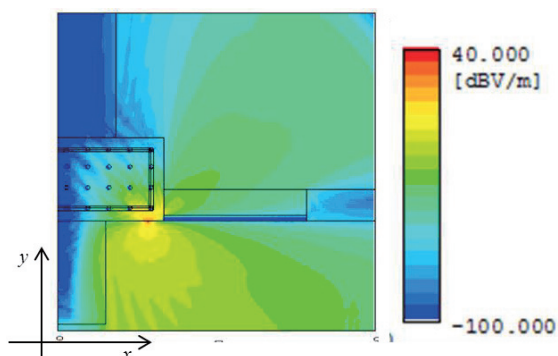


Fig. 13 FDTD simulation result of front chamber

Fig. 14~Fig. 16 は、実測値とシミュレーション値の両方を示している。実測値は、Fig. 5(d)における実測結果における値であり、シミュレーション値は、Fig.14 に示した結果から、実測点近傍の平均値を示している。Fig.14 ~Fig. 16 は、それぞれ ST の床からの高さが $z=0.8\text{m}$ 、 $z=1.05\text{m}$ 、 $z=1.55\text{m}$ での値である。

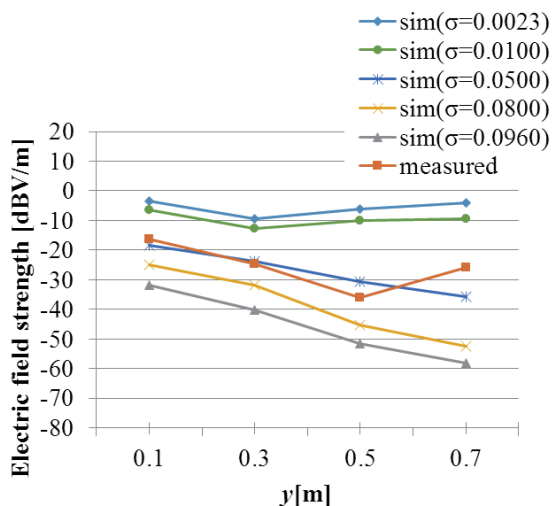


Fig. 14 Comparison of simulated electric field strength values on Fig. 5(d) to measured ones ($z=0.8\text{m}$)

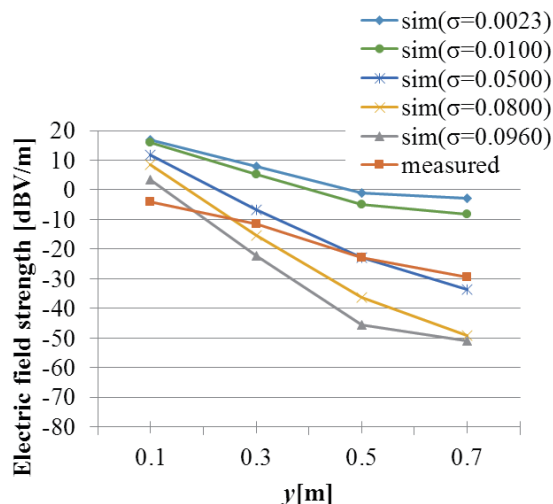


Fig. 15 Comparison of simulated electric field strength values on Fig. 5(d) to measured ones ($z=1.05\text{m}$)

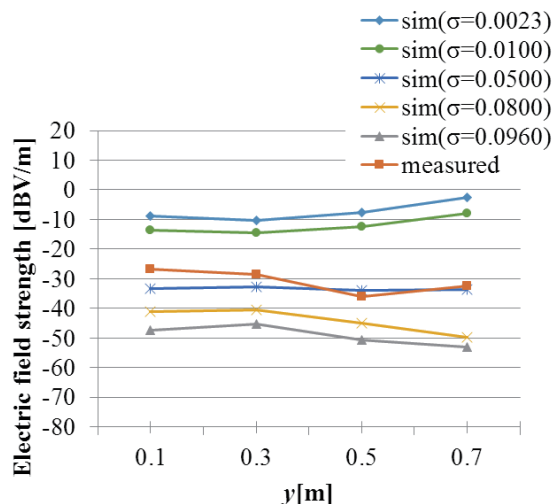


Fig. 16 Comparison of simulated electric field strength values on Fig. 5(d) to measured ones ($z=1.55\text{m}$)

Fig. 17~Fig. 19 は、Fig. 5 (b) における実測結果とシミュレーション値であり、それぞれ ST の高さが $z=0.8\text{m}$ 、 $z=1.05\text{m}$ 、 $z=1.55\text{m}$ での値である。実測値が存在しない箇所は、測定時の設定ビットレートが高すぎたため、必要な受信感度が得られず、値が得られなかったものである。

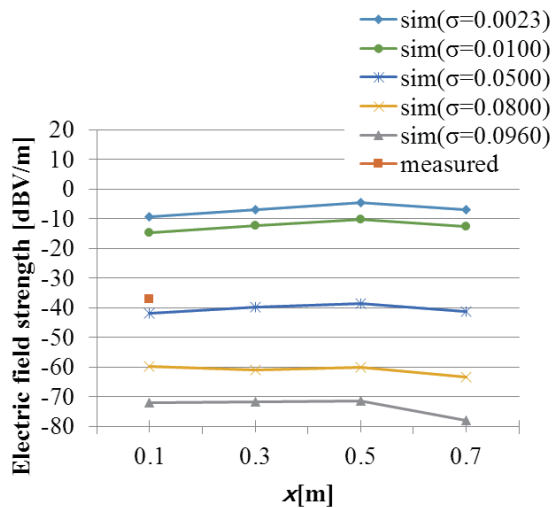


Fig. 17 Comparison of simulated electric field strength values on Fig. 5(b) to measured ones ($z=0.8m$)

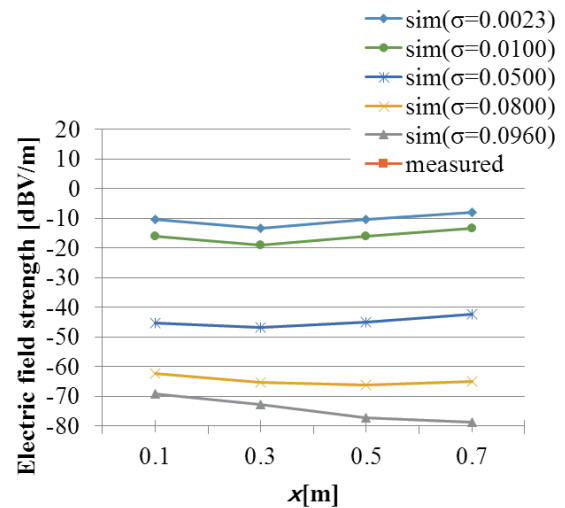


Fig. 19 Comparison of simulated electric field strength values on Fig. 5(b) to measured ones ($z=1.55m$)

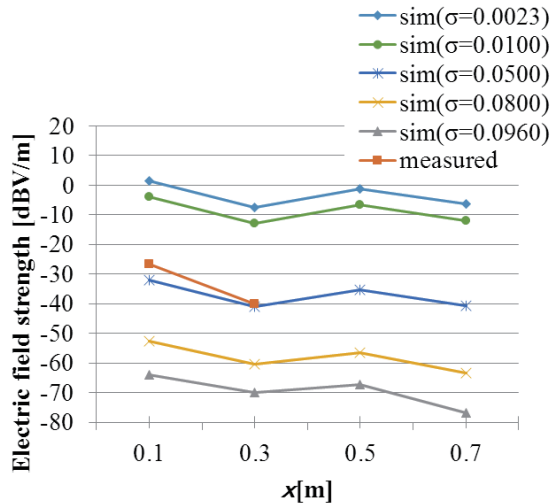


Fig. 18 Comparison of simulated electric field strength values on Fig. 5(b) to measured ones ($z=1.05m$)

4. 考察

4.1 電磁界シミュレーション結果に関する検討

Table 1 を見ると、水平にアンテナを配置した場合に比べて、垂直にアンテナを配置した場合の方が、評価エリア内の電界強度 (E_{90}) が高いことがわかる。これは、ダイポールアンテナの指向特性により、アンテナ位置から評価エリアに放射される電界強度が高いためと考えられる。

一方、構造物の有無による評価エリア内の電界強度の減衰量 ($|\Delta E_{90}|$) は垂直の方が大きい、それでも構造物がある場合の電界強度 ($E_{90} + \Delta E_{90}$) は、ほとんどのケースで垂直の方が高レベルにある。

E_{90} 、 ΔE_{90} とも、アンテナ高さ方向 (I_z) には感度が小さいが、金属扉から離れる方向 (I_y) には大きな変化がみられる。金属扉から離れた位置ほど減衰量 ($|\Delta E_{90}|$) が大きい傾向にある。

周波数間では、周波数が低いほど減衰量が小さい傾向にあるが、水平にアンテナを配置した場合に 980MHz よりも 2400MHz の方がわずかに小さい値となった。これは、アンテナ導体と、金属扉との間隔が一定という条件により、給電点の位置は、2400MHz の方が金属扉の近くに配置されるため、逆転現象が現れたものと考えられる。

Table 2 は、Table 1 の結果を元に、送信電力を 20dBm とした場合に、ダイポールアンテナにより評価エリア内の 90%の空間で得られると推定される最低受信電力を示し

ている。-90dBm を閾値とした場合、5000MHz ではアンテナ位置によっては通信不可能となるが、980MHz、2400MHz では十分通信可能であることがわかる。

Table 2 Estimated transmission radio wave minimum power in 90 % of evaluation area

P90(with objects)[dBm]						
	Horiz.			Vert.		
980MHz						
Iy=0	-56.3	-57.3	-56.3	-52.2	-57.4	-58.3
Iy=1	-59.4	-60.7	-59.7	-52.6	-55.9	-56.8
Iy=2	-58.2	-58.4	-58.6	-52.4	-56.3	-58.0
2400MHz						
Iy=0	-65.0	-65.7	-66.6	-66.3	-63.9	-65.5
Iy=1	-74.8	-77.2	-78.5	-68.3	-68.7	-68.6
Iy=2	-76.4	-78.6	-79.9	-71.6	-72.2	-72.0
5000MHz						
Iy=0	-79.0	-80.5	-83.4	-74.6	-77.3	-78.7
Iy=1	-103.9	-102.9	-111.5	-97.8	-93.4	-98.9
Iy=2	-115.1	-114.0	-125.5	-111.7	-109.0	-108.3
	Iz=0	Iz=1	Iz=2	Iz=0	Iz=1	Iz=2

4.2 実測値とシミュレーションの比較に関する検討

Fig. 14～Fig. 19 の、測定値の存在する測定点全 15 点のうち 1 点を除き $\sigma=0.0023$ と $\sigma=0.0960$ の間の値となり、 $\sigma=0.0500$ の場合が最も近い結果となった。導電率の違いによる減衰量の変動幅が大きく、コンクリート素材特性

の見積りが重要な要素であることがわかる。

5. 結論

発電プラントの RC 壁+金属扉構造の FDTD シミュレーションモデルを作成し、アンテナ配置、周波数による伝搬特性の評価を行い、その結果低い周波数で、垂直に配置する方が高いレベルで透過することが分かった。

導電率の高いコンクリート素材では、5000MHz では通信不可能となる可能性があるが、2400MHz、980MHz では通信可能となる見込みが立つことが分かった。

また RC 壁+金属扉構造の実建屋にて、2400MHz における実測を行い、FDTD シミュレーションと比較した結果、一般的なコンクリート素材の材質とされる導電率の幅内にあることが分かった。実際の発電プラントではその減衰率を確認することにより導電率を見積もることが無線ネットワークを構築する上で有用となる。

参考文献

- [1] 細矢：電波伝搬ハンドブック、リアライズ社、2004
- [2] ITU-R P1238-6、10/2009
- [3] http://www.e-em.co.jp/fdm/eem_fdm.htm
- [4] http://www2.contec.co.jp/prod_data/fxds540apdm/c01.pdf