

# 仮想導電率を用いた電磁シールド室空間性能の数値予測

笠井 泰彰 小熊 直樹  
渡辺 充敏

## Study of Numerical Analysis Method Using Virtual Conductivity for Spatial Performance of Electromagnetic Shielding Room

Yasuaki Kasai Naoki Oguma  
Mitsutoshi Watanabe

### Abstract

The performance measurement of the electromagnetic shielding room is performed by the insertion loss method. The measurement result indicates the local performance sandwiching a specific part. Therefore, we have proposed a measurement method that is closer to attaining the spatial performance. Meanwhile, in an actual shielding room, leakage from openings, such as joints and gaps, in which the width is difficult to define, affects spatial performance. We conducted a study pertaining on a method of introducing virtual conductivity into a narrow slit-like opening model. The results indicate the possibility to obtain a virtual conductivity that can predict rationally the average value of the radio waves leaking from the narrow opening.

### 概要

電磁シールド室の遮蔽性能の測定は、挿入損失法により行われている。このため、空間としての性能というよりも、挟んだ特定箇所周辺の部位性能としての性格が強い。そこで、筆者らは空間的な性能の把握に近い計測法の提案を行ってきた。一方、実際の電磁シールド室においては、継ぎ目や隙間など、幅の定義が困難な開口からの漏洩が空間性能に影響を及ぼすが、この漏洩量を予測したい場合の数値モデル化が難しい。そこで本報告では、幅の狭いスリット状の開口部モデルに仮想導電率を導入する方法について検討を行った。実測結果と解析結果の比較から、漏洩する電波の平均値を合理的に予測できる仮想導電率を求めることができた。

### 1. はじめに

電磁シールド室の性能測定は、対象部位を一对のアンテナで挟んで測定する挿入損失法により行われている。このため、得られる結果は空間性能というよりも、挟んだ特定部位周辺の性能(部位性能)としての性格が強い。

そこで、筆者らは現状の測定法についての課題を提示するとともに、より空間的な性能の把握に近く、かつ簡便な計測法の提案を行ってきた<sup>1)4)</sup>。なお現在、日本建築学会の計測法検討小委員会において、新たな電磁シールド空間性能に関する審議が行われている状況がある<sup>5)10)</sup>。

提案している空間性能計測方法は、シールド室内に送信アンテナ(垂直偏波)を設置し、室内外の分布計測を行い、その平均値の差とするものである(式1)。

$$S[\text{dB}] = \bar{E}_{in}[\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}] - \bar{E}_{out}[\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}] \quad (1)$$

ここで、 $S$ は電磁シールド空間性能、 $\bar{E}_{in}$ および $\bar{E}_{out}$ はシールド室内外の電界強度の空間平均値である。

一方、式1で定義された空間性能 $S$ は、有限差分時間領域法(FDTD法 Finite Difference Time Domain Method)を用いた数値予測ができる可能性が示されている<sup>5)9)</sup>。FDTD

法は空間および室モデルを有限サイズのセルに分割して計算を行う手法である。空間平均値の差で表現される空間性能を対象とすれば、従来困難であった電磁シールド性能の事前予測ができる可能性があり、より適切な設計・施工が可能となる。

しかしながら、実際の電磁シールド室においては、材料の目地や継ぎ目、扉と枠と隙間、亀裂やクラック・剥離など、幅の定義が困難な開口からの漏洩が空間性能に影響を及ぼすが、漏洩量を数値的に求めるためには、FDTD法で扱う有限サイズのセルではモデル化が難しい。

そこで本報告では、極めて幅の狭いスリット状の開口部モデルに仮想導電率を導入する方法について検討を行った。また、実際の電磁シールド室の電磁シールド空間性能を対象として、実測と仮想導電率を用いた解析を行い比較した。この結果についても報告する。

### 2. 数値計算モデルへの仮想導電率の導入

FDTD法におけるセルのサイズは、少なくとも式2のクーラン安定条件を満たす必要がある。ここで、 $c$ は位相速度[m/s]、 $\Delta t$ は計算タイムステップ[sec]、 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ は各軸方向のセルサイズ[m]である。

$$c\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad (2)$$

式2の安定条件を満足することを前提とし、さらに筆者らは計算精度向上のためセルサイズを最大周波数の波長λの1/10より小さくなるように設定している。幅の数値的な定義ができない開口の幅はセルサイズより狭くすべきであるが、セルサイズを小さくすることは、必要メモリを考慮すると難しい。したがって幅の定義が困難な隙間であっても幅1セルとしてモデル化せざるを得ない。

そこで、この問題を解決するために1セルの幅の開口に実在しない仮想媒質を満たし、実験との比較によりその仮想媒質の導電率σ[S/m]を求める手法について検討した。これにより開口部を通過する電波の減衰量を数値的にモデル化できると考えたためである。この実際には存在しない導電率を、以後仮想導電率とよぶこととする。

FDTD法の基礎式に含まれる比誘電率ε<sub>r</sub>は一般に複素数で表現される(式3)。ε'<sub>r</sub>は比誘電率の実部であり、損失項である虚数部ε''<sub>r</sub>に今回対象とする導電率 σ[S/m] が含まれる(式4)。つまり、開口を通過した電波は仮想導電率σにより減衰させられることになる。

$$\epsilon_r = \epsilon'_r + j\epsilon''_r \quad (3)$$

$$\epsilon''_r = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (4)$$

ただし、ε<sub>0</sub>は真空の誘電率[F/m]、ωは角周波数[rad/s]である。なお、本報告では、幅の狭い開口(Fig.1(a))をFDTD法で表現できる最小の開口幅でモデル化した(Fig.1(b))。

### 3. 測定と解析の比較による仮想導電率の推定

#### 3.1 幅の狭い開口から漏洩する電波の測定概要

仮想導電率を導入した計算結果と比較を行うため、反射の少ないダブルチャンバーの電波半無響室内の試料開口を用いた電波漏洩量の計測を行った。

周波数はWiFiなどに用いられるほか、過去の報告<sup>1)4)</sup>でも検討されている2.45GHzとし、送受信アンテナはともに垂直ダイポールとした。送信アンテナは試料開口中心で固定し、受信アンテナはアンテナ自動昇降装置を用いて12mm間隔の二次元計測を実施した。計測範囲は900mm角の試料開口の792mm×792mmの部分であり、試料と送受信アンテナの距離はともに300mmである。

試料開口には、FDTD法の1セルに相当する幅である(12mm ≅ λ/10)の開口をもつ試料と、アルミ箔をプラスチックボードに貼りカッターで傷をつけた幅の狭い開口(以後、“カッター傷”と表記)の試料を用意した。Table 1に示す8種類の試料を取り付けて漏洩電界強度[dB μV/m]の計測を実施した。Photo 1に実験時におけるダブルチャンバー実験室の受信室側の写真を示す。

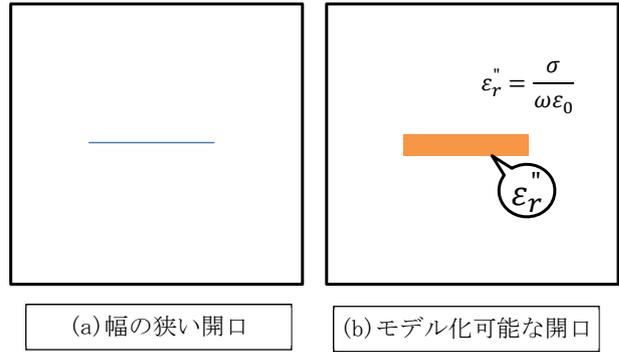


Fig. 1 開口モデルへの仮想導電率の導入  
Introduction of Virtual Conductivity

Table 1 試料一覧  
List of Specimen

試料名	開口長さ	開口幅
120a	120mm	12mm
120b	120mm	カッター傷
240a	240mm	12mm
240b	240mm	カッター傷
360a	360mm	12mm
360b	360mm	カッター傷
600a	600mm	12mm
600b	600mm	カッター傷

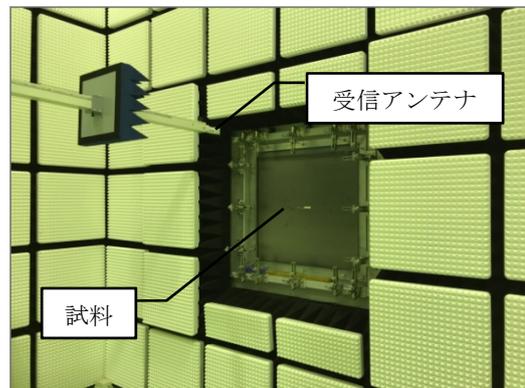


Photo 1 測定状況  
Measurement Situation

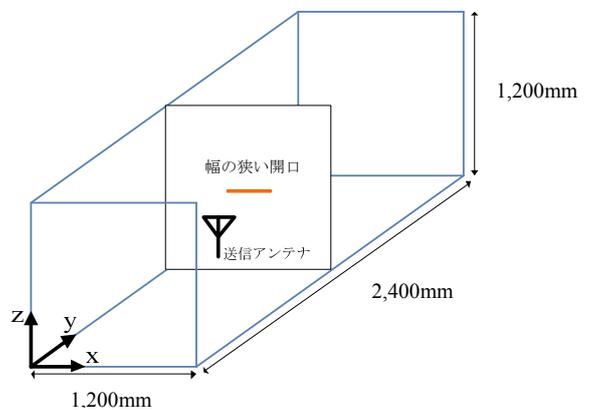


Fig. 2 数値計算モデル  
Numerical Calculation Model

### 3.2 幅の狭い開口から漏洩する電波の数値計算概要

仮想導電率の値を求めるため、カッター傷の試料を、Fig.1(b)のように数値モデル化し、その他は同条件として漏洩量の計算を行った。数値解析はFDTD法を用いた。セルサイズは12mmとし、解析空間は1,200mm×2,400mm×高さ1,200mmの領域(総セル数は2Mセル)とした。吸収境界条件はPML(Perfectly Matched Layer)を用いている。受信点にはアンテナモデルを置かず、電界強度のz方向成分を予測値として用いている。また、計算領域全体のモデル図をFig.2に示す。

### 3.3 測定結果と解析結果の比較

Fig.3に試料120aの測定結果、Fig.4に試料120aの計算結果、Fig.5に試料120bの測定結果、Fig.6に試料120bの仮想導電率を用いた場合の計算結果を示す。測定結果は全て3.1節の結果である。同様に、Fig.7, Fig.8, Fig.9, Fig.10に試料360aおよび360bについて測定および計算結果を示す。計測および計算エリアの大きさは縦横ともに792mmの正方形(各図の軸目盛は200mm毎)である。また、仮想導電率は過去の検討<sup>6)</sup>を参考に0.40S/mと仮定した。

また、Table 2に測定値(または格子上計算値)の壁面に並行な水平方向中心線(赤点線)上の平均値(以後「線平均」)のまとめを示す。文献3)に二次元分布の平均値の代わりに一次元分布の平均値を用いても問題ないことが実験的に示されているため、本検討では中心線上の平均値を用いて電波の漏洩特性を評価することとした。

Fig.3とFig.4は、同条件での計測結果と計算結果である。分布の詳細は異なるが、線平均はよく一致している。一方、Fig.5のカッター傷からの漏洩量を計算で再現しようとした場合、Fig.4のように開口部に仮想導電率を導入しない従来の方法では漏洩量が多く一致しないが、本報告で提案する仮想導電率を用いる方法(Fig.6)では、漏洩量を低減し改善することができている。また、これらの傾向は、開口の長さが長いFig.7~Fig.10や、Table 2の試料240a、試料240b、試料600a、試料600bでも同様であった。

### 3.4 仮想導電率の最適化

そこで、漏洩した電波の電界強度 $E$ について、実測結果と予測結果の差の絶対値を開口長さ $L$ 毎に求め、その和を残差 $D$ として式5のように定義した。

$$D(\sigma) = \sum_L \|E_{calc}(L, \sigma) - E_{meas}(L)\| \quad (5)$$

ここで、 $E_{calc}(L, \sigma)$ は仮想導電率を用いて計算した電界強度、 $E_{meas}(L)$ は開口長さ $L$ 毎に実測した電界強度であり、開口長さ $L$ は、 $L=120, 240, 360, 600$ mmである。

この残差 $D(\sigma)$ を最小化する仮想導電率 $\sigma$ が、幅の定義ができないスリットをFig.1(b)の数値モデルを用いて予測する場合に、最も適切な値であると考えた。

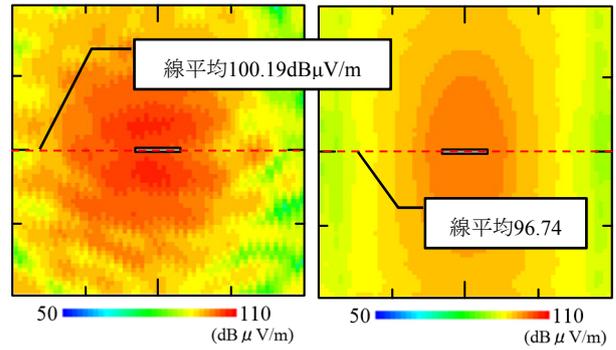


Fig. 3 試料120a測定  
幅12mm開口  
Type120a Measured

Fig. 4 試料120a計算  
幅12mm開口  
Type120a Calculated

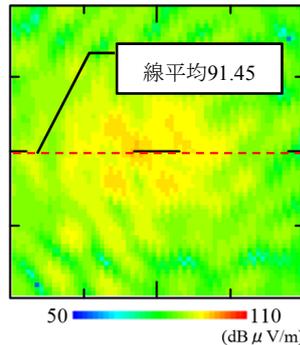


Fig. 5 試料120b測定  
カッター傷  
Type120b Measured

Fig. 6 試料120b計算  
 $\sigma = 0.40S/m$   
Type120b Calculated

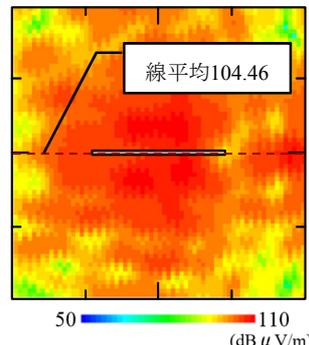


Fig. 7 試料360a測定  
幅12mm開口  
Type360a Measured

Fig. 8 試料360a計算  
幅12mm開口  
Type360a Calculated

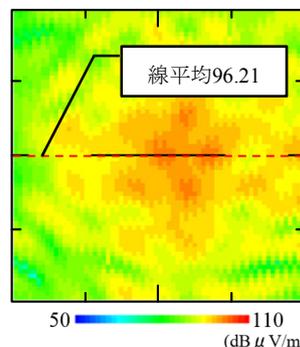


Fig. 9 試料360b測定  
カッター傷  
Type360b Measured

Fig. 10 試料360b計算  
 $\sigma = 0.40S/m$   
Type360b Calculated

残差 $D$ —仮想導電率 $\sigma$ 特性をFig.11に示す。Fig.11およびTable 2より開口の長さに依らず仮想導電率を0.22S/mにすれば残差 $D$ を最小化できることがわかる。Table 3に仮想導電率を0.22S/mとしたときの、電波の漏洩量の線平均の比較を示す。幅が狭くFDTD法で計算するにはモデル化が困難な開口の平均漏洩量を仮想導電率を導入した計算モデルを用いて求めた結果,導入せずに計算した場合に比べ5dB程度の改善がみられ、実測値により近い値が得られている。以上より、開口の長さに依らず電波の漏洩量を合理的に予測することができたことがわかる。

#### 4. 実際のシールド室を対象とした検討

前章で得られた仮想導電率0.22S/mは、対象周波数が2.45GHz、スリット開口計算モデルの幅12mm,開口の長さ120mm~600mmなどの限定的な条件下で求めたものである。したがって、例えば周波数が異なる場合などはダブルチャンバー実験室において、その都度同様の検討が必要となる。

また、実際のシールド室においては、幅の定義ができない隙間やクラックの長さが必ず600mm以下とは限らない。このため、今回求めた仮想導電率を用いて実際の室から漏洩する電磁波についても実測値と比較しておく必要がある。

##### 4.1 シールド室を対象とした測定の概要

今回対象とした電磁シールド室の外観写真をPhoto 2に示す。アルミ箔をシールド層とした内寸がW2,800mm×D4,800mm×H3,000mmの室である。今回の実験計測を目的として、主として室の角部等のシールド材料接合部に幅の定義が困難な隙間を設けているほか、扉も通常のスチールドアにシールド用導電パッキンを取付けた簡易な仕様の実験用シールド室である。

測定は距離エンコード台車(Photo 3)を用いて行った。エンコード台車は距離を計測する車輪型エンコーダからの情報とスペクトラムアナライザの計測情報をPCに同時に書き込むことが可能で、距離分解能が高くかつ再現性の高い計測が可能である<sup>1)3)</sup>。Fig.12に対象室の平面図を示す。送信アンテナ位置は部屋を中心とし、アンテナ高さはFL+1,500mmとした。台車が走行する測定ラインは扉のある壁面から300mm離れた位置に設け、測定ライン上の電界強度を12mm間隔で測定した。受信アンテナの高さは送信アンテナ高さと同じである。送受信アンテナには半波長ダイポールアンテナを用い、偏波は垂直偏波とした。また、対象周波数は2.45GHzである。

##### 4.2 シールド室を対象とした数値計算の概要

数値計算は実験室での検討と同様にFDTD法を用いた。セルサイズは12mmとし、解析空間は壁面から外側に1,500mmまでの範囲を含むW5,800mm×D7,800mm×H3,000mmであるとした。吸収境界条件はPMLである。

Table 2 平均漏洩量(dB $\mu$ V/m)の比較  
Comparison of Average Leakage Levels

開口長さ L(mm)	測定結果		計算結果	
	開口幅 12mm	幅の狭い開口 (カッター傷)	開口幅 12mm	仮想導電率 $\sigma = 0.40\text{S/m}$
120	100.19	91.45	96.74	88.08
240	103.21	96.26	100.23	91.58
360	104.46	96.21	101.74	93.82
600	105.46	97.97	102.49	95.06

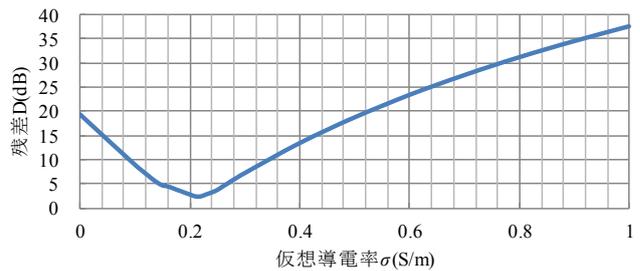


Fig.11 残差 $D$ —仮想導電率 $\sigma$ 特性  
Residual error-Virtual Conductivity Characteristic

Table 3 平均漏洩量(dB $\mu$ V/m)の比較( $\sigma = 0.22\text{S/m}$ )  
Comparison of Average Leakage Levels

開口長さ L(mm)	測定結果	計算結果
	幅の狭い開口 (カッター傷)	仮想導電率 $\sigma = 0.22\text{S/m}$
120	91.45	91.27
240	96.26	94.57
360	96.21	96.69
600	97.97	97.96



Photo 2 対象室外観  
Target Room



Photo 3 エンコード台車  
Encoding Trolley

床・壁・天井・扉は理想的な完全導体としてモデル化している。送信アンテナはダイポールアンテナ、アンテナ位置、周波数等は測定条件と同様とした。数値計算モデルをFig.13に示す。

幅の定義が困難な隙間や接合部がある場所として、室の4隅(壁面どうしの取合い部)、床・天井と壁面の取合い部、および扉周りのシールドパッキン部が支配的であると考え、それら全てに幅12mmの線状の開口があると仮定して計算モデルを作成した(Fig.13桃線部が開口)。

計算は、この開口部に仮想導電率を与えない場合と、前章までの検討結果である  $\sigma=0.22\text{S/m}$  を与えた場合の2通りについて行うこととする。

漏洩電波の電界強度を計算する範囲は、台車の走行する測定ラインと同じ、扉のある壁面から300mm離れた線上とした。高さはFL+1500mmである。

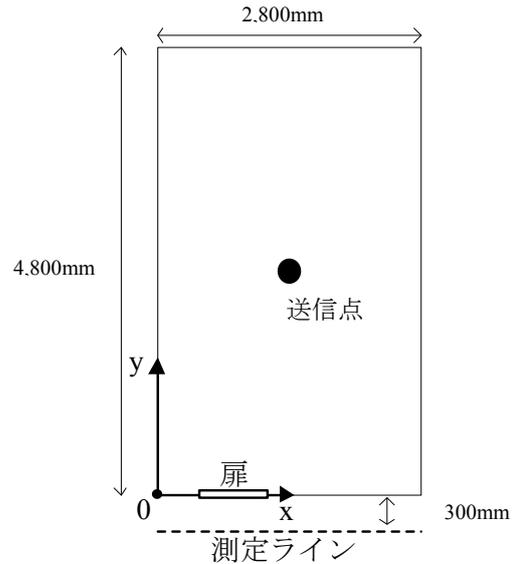


Fig.12 対象室平面図と台車走行ライン  
Plane of Target Room and Trolley Traveling Line

### 4.3 シールド室漏洩量の測定結果と計算結果の比較

測定ライン上の電界強度の測定結果、および数値計算結果をFig.14に示す。図の破線は扉の位置を示している。結果はいずれも扉近傍で最も高い電界強度となった。また、桃線部に仮想導電率を与えず開口のみとした場合の空間特性の形状は、測定結果と比較して全体的に電界強度の値が高い傾向であるが、開口部に実験室で求めた仮想導電率  $=0.22\text{S/m}$  を与えることで計算上の漏洩量が抑えられ、測定結果との差が小さくなっていることが確認できる。このときの電界強度の分布図をFig.15に示す。

過去に提案した電磁シールド空間性能の測定方法<sup>1)</sup>では、シールド室内外で計測した空間平均値の差を空間性能と定義していた(式1)。このため、3つの結果の空間的な平均値を計算した(Table 4)。測定結果と計算結果を比較すると、開口部に仮想導電率を与えることで、平均値の差は1dB以下となった。

これにより、600mmの長さの開口までのダブルチャンバー実験室での比較結果から求めた仮想導電率を、実際のシールド室の漏洩量計算に使用しても、予測精度を向上させられることを確認できた。

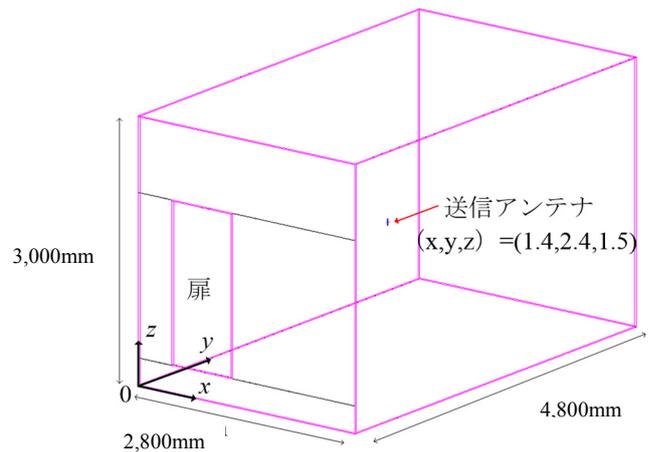


Fig.13 対象室の計算モデル  
Calculation Model of Target Room

### 4.4 電磁シールド空間性能

前項で比較を行った量は、シールド室内から室外に漏洩する電波の空間平均値であった。これは式1でいえば、 $\bar{E}_{out}$ であり、空間性能Sではない。そこで、シールド室内における電界の空間平均 $\bar{E}_{in}$ を実測および数値計算で求め、空間性能Sの比較を行った。

空間平均 $\bar{E}_{in}$ の実測および計算は対象壁面から室内側300mm、高さ1,500mmの線を対象(台車走行ライン)とした。数値計算は、仮想導電率を与えない場合、0.10S/m、0.15S/m、0.22S/mの4つの場合について行っている。

実測結果と計算結果の比較をTable 5に示す。仮想導電率が0.22S/mのとき、電磁シールド空間性能Sの実測結果との差は2dB未満となった。仮想導電率を与えない場合では約7.5dBもの差がある。電磁シールド空間性能を予測

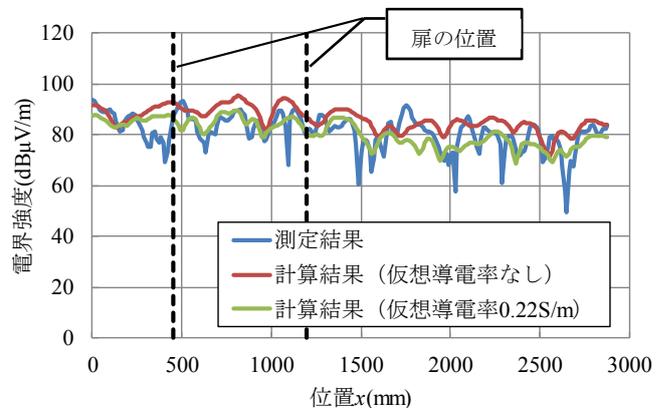


Fig.14 測定ラインにおける電界強度の分布比較  
Comparison of Electric Field Intensity  
on Trolley Traveling Line

する場合においても、実験室で求めた仮想導電率が有効であることがわかった。

5. まとめ

電磁シールド空間性能の数値予測を目的として、極めて幅の狭いスリット状の開口部の計算モデルに仮想導電率を導入する方法について検討を行った。

得られた結果を以下に示す。

- 1) 実験室での検討では、600mmの長さまでの開口であればその長さに依らず、幅の狭い開口から漏洩する電波の平均値を合理的に予測できる仮想導電率 $\sigma$ を求めることができた。
- 2) 実験室で求めた仮想導電率を実際の電磁シールド室のスリット状の開口部に用いてモデル化した結果、電磁波の漏えい量の線平均の実測結果と計算結果の差は1dB以下となり、よい一致を示した。
- 3) 電磁シールド室の空間性能においても実測結果と計算結果の差は2dB未満となることから、FDTD法では幅の定義が困難な開口部のモデル化が可能であり、実験室で求めた仮想導電率を用いることで実際の電磁シールド室の空間性能を予測できる可能性があることが確認できた。

導電率を持つ仮想媒質を数値スリットに適用する手法はこれまでになく、また電磁シールド空間性能を予測するために非常に有効な手段である可能性があることがわかった。これまで困難であるとされていた電磁シールド室の遮蔽性能予測の実用化に寄与するものと考えられる。

今後は、2.45GHz以外の周波数についても同様の検討を実施する予定である。

参考文献

- 1) 笠井泰彰：電磁シールド性能評価手法に関する一考察，日本建築学会学術講演梗概集，日本建築学会学術講演梗概集，pp.1017-1018, 2006.9
- 2) 笠井泰彰：電磁シールド室の空間性能評価手法の提案，大林組技術研究所報，No.71, 2007
- 3) 笠井泰彰：電磁シールド性能評価手法に関する一考察，その2 壁面の2次元分布測定と1次元分布測定，日本建築学会学術講演梗概集，pp.639-640 2008.9
- 4) 笠井泰彰,渡辺充敏：電磁シールド性能評価手法に関する一考察，その4 測定の簡便性と結果の安定性，日本建築学会学術講演梗概集，pp.573-574 2010.9
- 5) 笠井泰彰,三枝健二：電磁シールド室の空間性能評価に向けた取り組み，日本建築学会学術講演梗概集，pp.535-536, 2015.9
- 6) 三枝健二,他：電磁シールド室の空間性能評価に向け

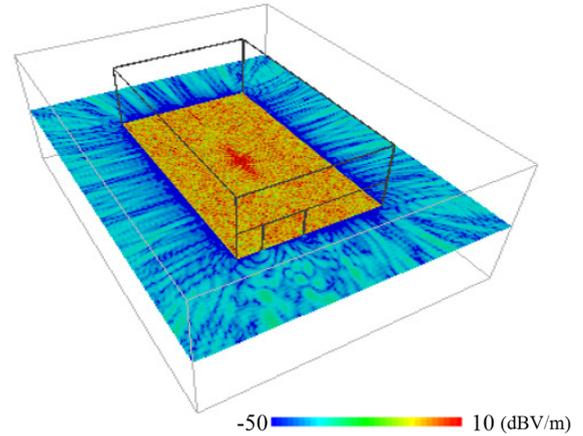


Fig.15 仮想導電率を用いた漏洩電磁波の予測結果  
Prediction Results of Leakage Electromagnetic Waves using Virtual Conductivity (z=1500mm)

Table 4 対象室の平均漏洩量の比較  
Comparison of Average Leakage Levels

	測定結果	計算結果 $\sigma$ なし	計算結果 $\sigma=0.22S/m$
平均漏洩量 (dB $\mu$ V/m)	81.17	86.21	80.71

Table 5 電磁シールド空間性能の比較  
Electromagnetic Shielding Spatial Performance

測定結果	電磁シールド空間性能(dB)			
	$\sigma$ なし	0.10S/m	0.15S/m	0.22S/m
43.3	35.83	39.39	40.25	41.34

- た取り組み その2 シールド室内の電磁界分布の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.537-538, 2015.9
- 7) 笠井泰彰,三枝健二：電磁シールド室の空間性能評価に向けた取り組み その3 基準値測定におけるアンテナ指向性影響の数値的検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.535-536, 2016.9
- 8) 三枝健二,他：電磁シールド室の空間性能評価に向けた取り組み その4 空間性能値の解釈の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.635-636, 2016.9
- 9) 藤田大輝：電磁シールド室の空間性能評価における解析の有効性に関する検討，日本建築学会 第20回電磁環境研究発表会 資料集，pp.8-9, 2017.2
- 10) 笠井泰彰,三枝健二：電磁シールド室の空間性能評価に向けた取り組み その5 開口のサイズが空間性能に与える影響について，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.569-570, 2017.9