

エンクロージャのシールド効果の測定 — IEEE 299 の概要

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2024 年 2 月 6 日

目次

1	はじめに	1
2	一般	1
2.1	概要	1
2.2	シールド効果	2
3	測定法	3
3.1	低周波測定 (9 kHz~20 MHz)	3
3.1.1	使用アンテナ	3
3.1.2	基準測定	3
3.1.3	エンクロージャの測定	3
3.2	共振領域測定 (20 MHz~300 MHz)	3
3.2.1	エンクロージャの基本共振周波数	3
3.2.2	使用アンテナ	8
3.2.3	測定周波数	8
3.2.4	基準測定	8
3.2.5	エンクロージャの測定	8
3.3	高周波測定 (300 MHz~18 GHz)	9
3.3.1	使用アンテナ	9
3.3.2	基準測定	9
3.3.3	エンクロージャの測定	9
4	参考資料	9

1 はじめに

IEEE 299^[1] ではシールド・エンクロージャのシールド効果 (shielding effectiveness; SE) の評価の方法が述べられている。

この規格は 9 kHz~18 GHz の周波数範囲での適用が想定されているが、50 Hz~100 GHz の周波数範囲での適用も可能である。また、この規格は測定法のみを定めており、実際に評価を行なう周波数範囲や合否基準はこの規格を使用する者 (例えばシールド・エンクロージャの製造業者や所有者) が決定することが必要となるだろう。

本稿ではこの規格、IEEE 299-2006 の概要を述べる。なお、本稿は規格の内容全てをカバーするものではなく、また正確であるとも限らないので、規格についての正確な情報は規格そのもの^[1]を参照していただきたい。

2 一般

2.1 概要

- この規格は最短寸法が 2 m 以上のシールド・エンクロージャへの適用が意図されている。より小さいシールド・エンクロージャの評価方法は別の規格、IEEE 299.1^[2] で述べられている。^{†1}
- この測定法の電波暗室への適用は意図されていない。電波暗室のシールド性をこの規格で評価しようとする場合、電波吸収体を取り付ける前の実施が必要となる。
- 低周波領域、共振領域、及び高周波領域の 3 つの周波数領域、また推奨される送受信アンテナが、表 1 に示すように規定され、それぞれの周波数領域について測定法が述べられている。
- 周波数掃引を行なうのではなく、表 1 に示したそれぞれの周波数領域から選択されたスポット周波数 (共振領域についてはそれに加えてその近傍の複数の周波数) での測定を行なうことが想定されている。
- エンクロージャの外側に送信アンテナを、エンクロージャの内側に受信アンテナを置くように述べられている。^{†2}

^{†1} また、MIL-STD-285^{[3][7]} や MIL-STD-1377^[4] でもこれらと幾分似た評価方法が述べられている。

^{†2} 測定対象のエンクロージャのシールド性にもよるが、相当のレベルの電磁界を放射させることが必要となるだろう。このため、法的な制限のため、また周囲への干渉の防止のため、可能な場合は測定対象のエンクロージャそのものを大きなシールド・ルームや電波暗室の中に置いて測定を行なう、逆にシールド・エンクロージャの内側から照射するようにする (そのようにした場合はこの規格に従った測定とは言い難くなるが³⁾) などの対応が必要となるかも知れない。

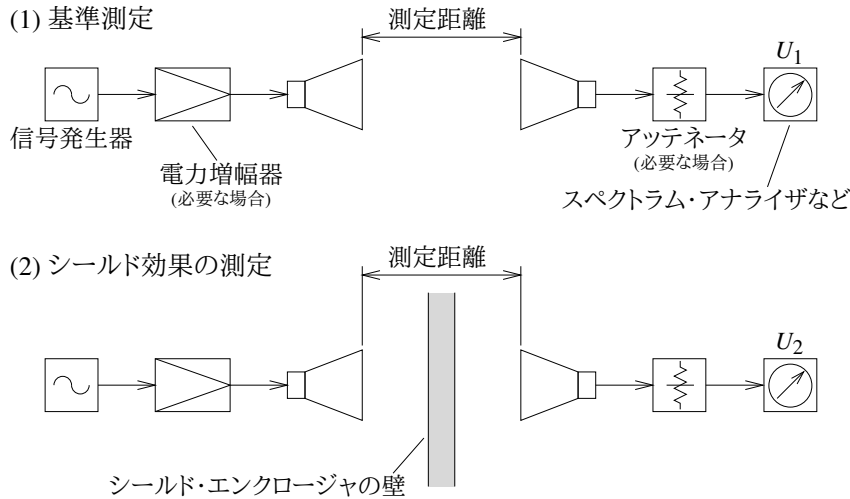


図 1: シールド効果の測定の原理

- 低周波領域ではシールドの継ぎ目や換気口などのようなシールドが不連続な箇所を評価するが、共振領域と高周波領域の評価はシールドの継ぎ目や開口部とは無関係に行なう。
- 共振領域と高周波領域の評価ではエンクロージャの内面に沿って受信アンテナの位置と向きを変えた時の最大の読み (最小の伝播減衰量) を取る^{†3}ように規定されており、実際の作業はやや煩雑となる。

低周波領域	
(50 Hz ~ 9 kHz)	静電遮蔽された小型ループ
9 ~ 16 kHz	
140 ~ 160 kHz	
14 ~ 16 MHz	
共振領域	
20 ~ 100 MHz	バイコンカル
100 ~ 300 MHz	λ/2 ダイポール
高周波領域	
0.3 ~ 0.6 GHz	ホーン
0.6 ~ 1.0 GHz	
1.0 ~ 2.0 GHz	
2.0 ~ 4.0 GHz	
4.0 ~ 8.0 GHz	
8.0 ~ 18 GHz (18 ~ 100 GHz)	

表 1: 周波数領域と送受信アンテナ

2.2 シールド効果

シールド効果 (shielding effectiveness) はシールドによって電磁界がどれだけ減衰するかを示すものである。

電界、あるいは平面波に対するシールドを考えた場合、シールドがない状態での放射源からある距離離れた位置での電界強度を E_1 ($\mu\text{V}/\text{m}$)、その他の条件を同一のままにシールドを通すようにした場合の電界強度を E_2 ($\mu\text{V}/\text{m}$) とすると、そのシールド効果 SE (dB) は

$$SE = 20 \log_{10} \frac{E_1}{E_2}$$

のように、また磁界に対する SE は電界強度 E ($\mu\text{V}/\text{m}$) の代わりに磁界の強さ H ($\mu\text{A}/\text{m}$) を (あるいは磁束密度 B (T) を) 用いて同様に

$$SE = 20 \log_{10} \frac{H_1}{H_2}$$

^{†3} しばしば行なわれるように、単純にエンクロージャの壁を介して送受信アンテナを対向させて測定するだけではない。

のように求めることができる。

さらに、測定系が同一であれば、測定された電圧にアンテナ係数を適用して電界強度や磁界の強さに換算するまでもなく、シールドがない状態での測定値を U_1 (μV)、シールドを通した時の測定値を U_2 (μV) として、

$$SE = 20 \log_{10} \frac{U_1}{U_2}$$

より求めることができる。

測定結果をデシベルで (例えば $E_{(\text{dB})}$ ($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$))

や $U_{(dB)}$ ($\text{dB}\mu\text{V}$) で表現すれば、 SE (dB) は単純に

$$SE = E_{1(\text{dB})} - E_{2(\text{dB})}$$

$$SE = U_{1(\text{dB})} - U_{2(\text{dB})}$$

のようになる。

3 測定法

3.1 低周波測定 (9 kHz~20 MHz)

3.1.1 使用アンテナ

直径 0.3 m の静電遮蔽されたループ・アンテナを用いる。

3.1.2 基準測定

基準測定は、送受信ループの面を共通の面に合わせ、測定時の壁の厚さを考慮した基準距離を隔てて配置して行なう (図6)。

3.1.3 エンクロージャの測定

この周波数領域ではシールド・エンクロージャの扉、パネルの継ぎ目、換気口、貫通コネクタの周囲のような、シールドが不連続な箇所について測定を行なう。

- 単一のパネルから成る扉 (図2):
 - ループの面を水平として、左右の継ぎ目の上端と下端 (扉の角) とそれらから高さの $1/3$ の位置
 - ループの面を垂直として、上側の継ぎ目の両端 (扉の角) とその中点、また下側の継ぎ目の両端 (扉の角) の $D/2$ (D はループの外径) 上^{†4}とその中点
 - 扉が 1.5×2.5 m よりも大きい場合、測定箇所の間隔が 1 m を超えないように追加された測定箇所

^{†4} 扉の下側の継ぎ目は床面近くに設けられ、その正面にループを置けないことが多いため、ループの位置をその半径分だけ上げるように規定されている。これはパネルの継ぎ目が床面近くにある場合も同様である。

- 複数のパネルから成る扉 (例えば両開きの扉) (図2):
 - それぞれのパネルの上記と同様の位置
- パネルの継ぎ目 (図3):
 - それぞれの継ぎ目の中点
- 換気口、アクセス・パネル、コネクタ・パネル:
 - 継ぎ目と同様の位置
 - 換気口はそれが設けられたパネル、及びそのパネルと換気口の継ぎ目
- 単一の、あるいは少数の貫通コネクタ:
 - その位置 1 箇所

測定は、送信用のアンテナをシールドの内壁から 0.3 m の距離に、また受信用のアンテナをシールドの外壁から 0.3 m の距離に、双方のループの面をシールドの面に直交する同一の面に合わせるように^{†5}配置して行なう。但し、角の継ぎ目の測定では、角の外側の斜めの位置にループを配置できれば角に対して斜めとなる配置 (図4) で、さもなくば角の近くの面を挟んだ配置 (図5) で測定を行なう。

継ぎ目の測定では、それぞれの位置から少なくとも継ぎ目の長さの $1/4$ の範囲でアンテナを動かして最大の読み (最小の伝播減衰量) を記録する。

3.2 共振領域測定 (20 MHz~300 MHz)

3.2.1 エンクロージャの基本共振周波数

この周波数領域ではエンクロージャの基本共振周波数^{†6}が測定範囲内にある可能性が高く、このような共振は測定結果に著しい影響を与える可能性がある。^{†7}通常は共振周波数やその近傍での測定は避けるべきだが、共振効果と無関係に測定を行なうように規定される場合もあるかも知れない。

^{†5} すなわち、送受信ループの配置は共面 (coplanar) とする。これはループをシールドの面と平行として双方のループの軸を合わせる (同軸) ように配置する、すなわち同軸 (coaxial) とする NSA 94-106^[6] にあるような測定法とは異なる。

^{†6} 最も低い空洞共振周波数。

^{†7} 共振の影響を受けているかどうかは、周波数に対するカーブ (周波数掃引での測定を行なっている場合) から、あるいはエンクロージャ内のアンテナの位置を動かした時の測定結果の変動から推定できるかも知れない。

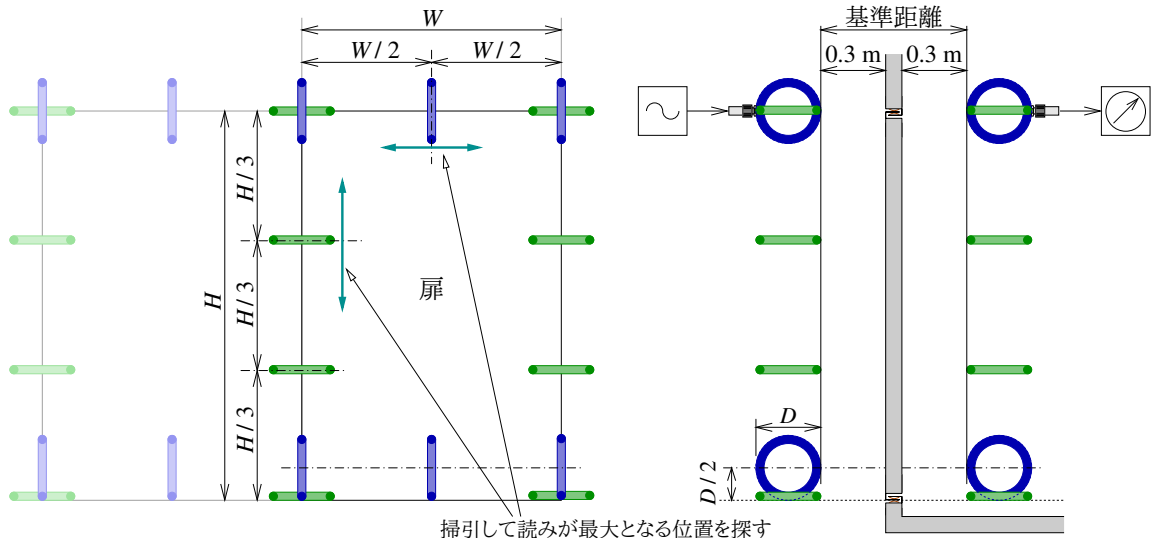


図 2: 低周波領域の測定でのアンテナの配置 — 扉

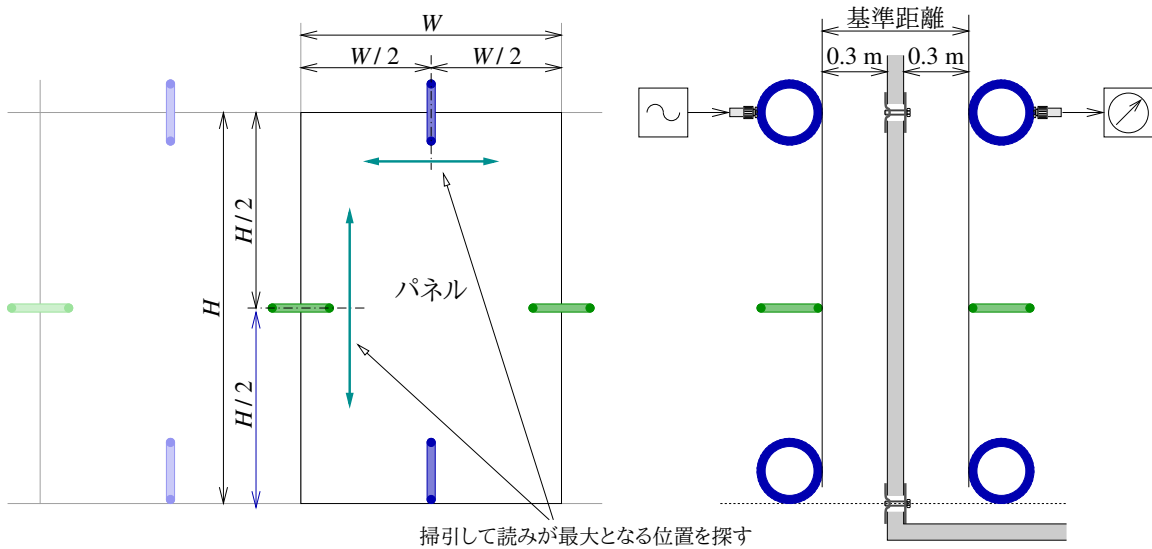


図 3: 低周波領域の測定でのアンテナの配置 — パネルの継ぎ目

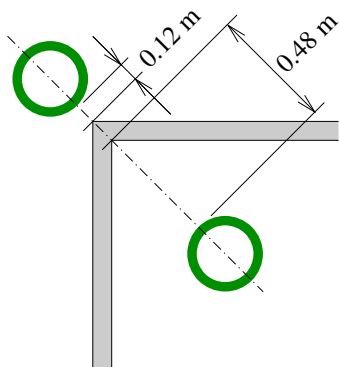
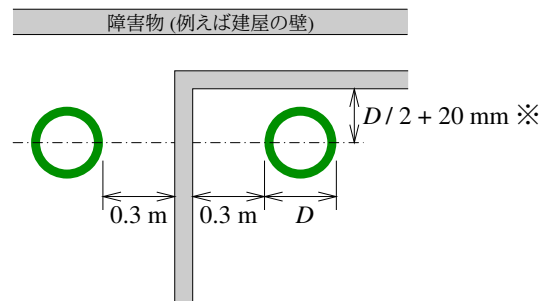


図 4: 低周波領域の測定でのアンテナの配置 — 角の継ぎ目



※ IEEE 299-2006 Figure 2(e) では外面からの距離となっている

図 5: 低周波領域の測定でのアンテナの配置 — 角の継ぎ目 (障害物がある場合)

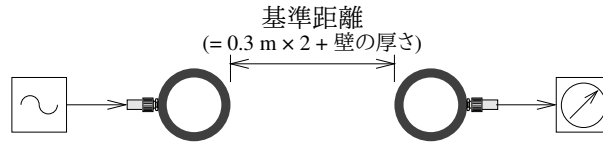
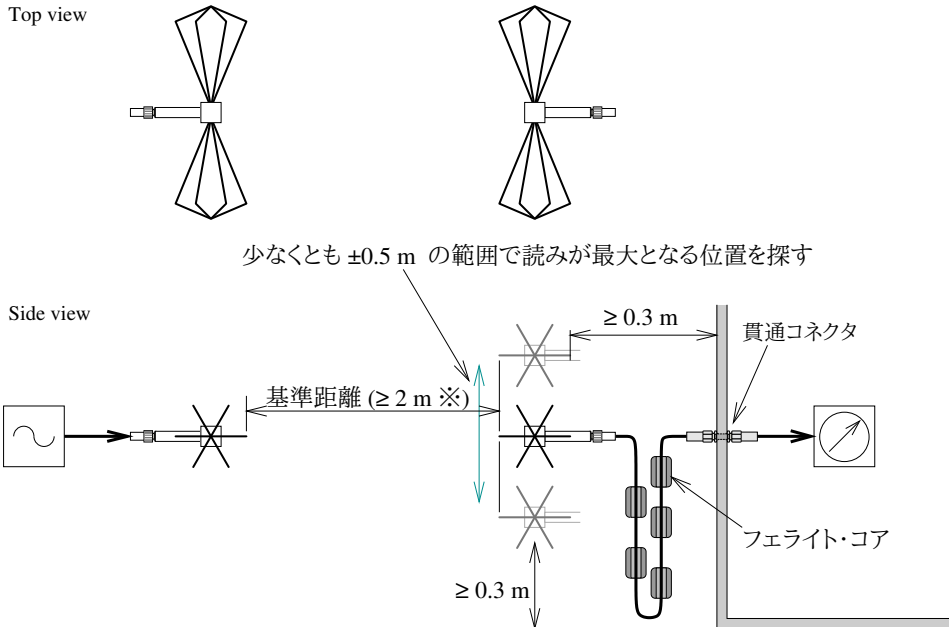


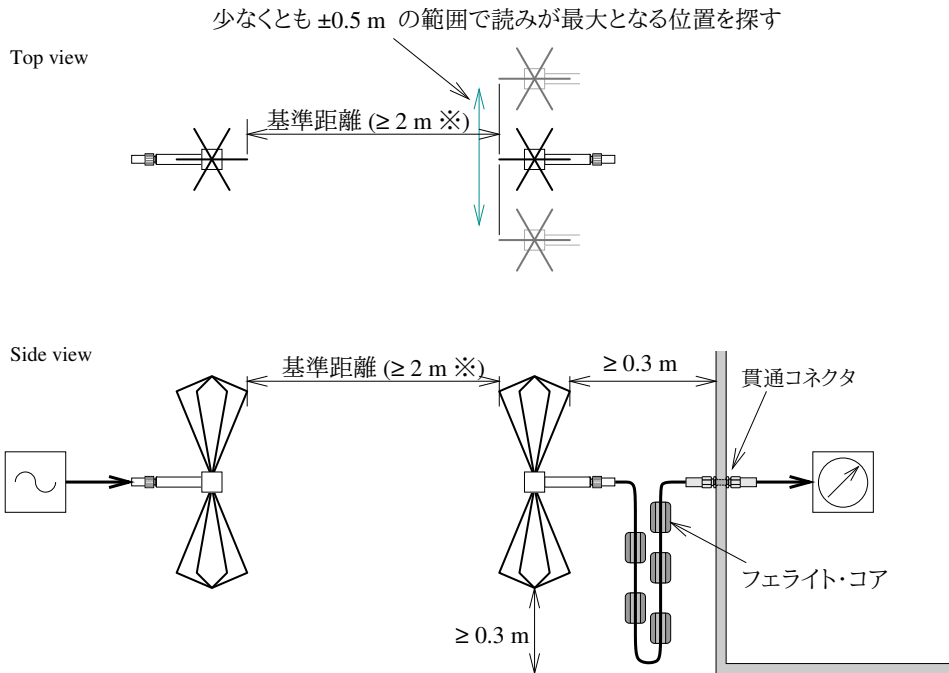
図 6: 低周波領域の基準測定



少なくとも ± 0.5 m の範囲で読みが最大となる位置を探す

※ 距離の制約から 2 m の測定距離を取れない場合は 1~2 m

図 7: 共振領域の基準測定 — 水平偏波



少なくとも ± 0.5 m の範囲で読みが最大となる位置を探す

※ 距離の制約から 2 m の測定距離を取れない場合は 1~2 m

図 8: 共振領域の基準測定 — 垂直偏波

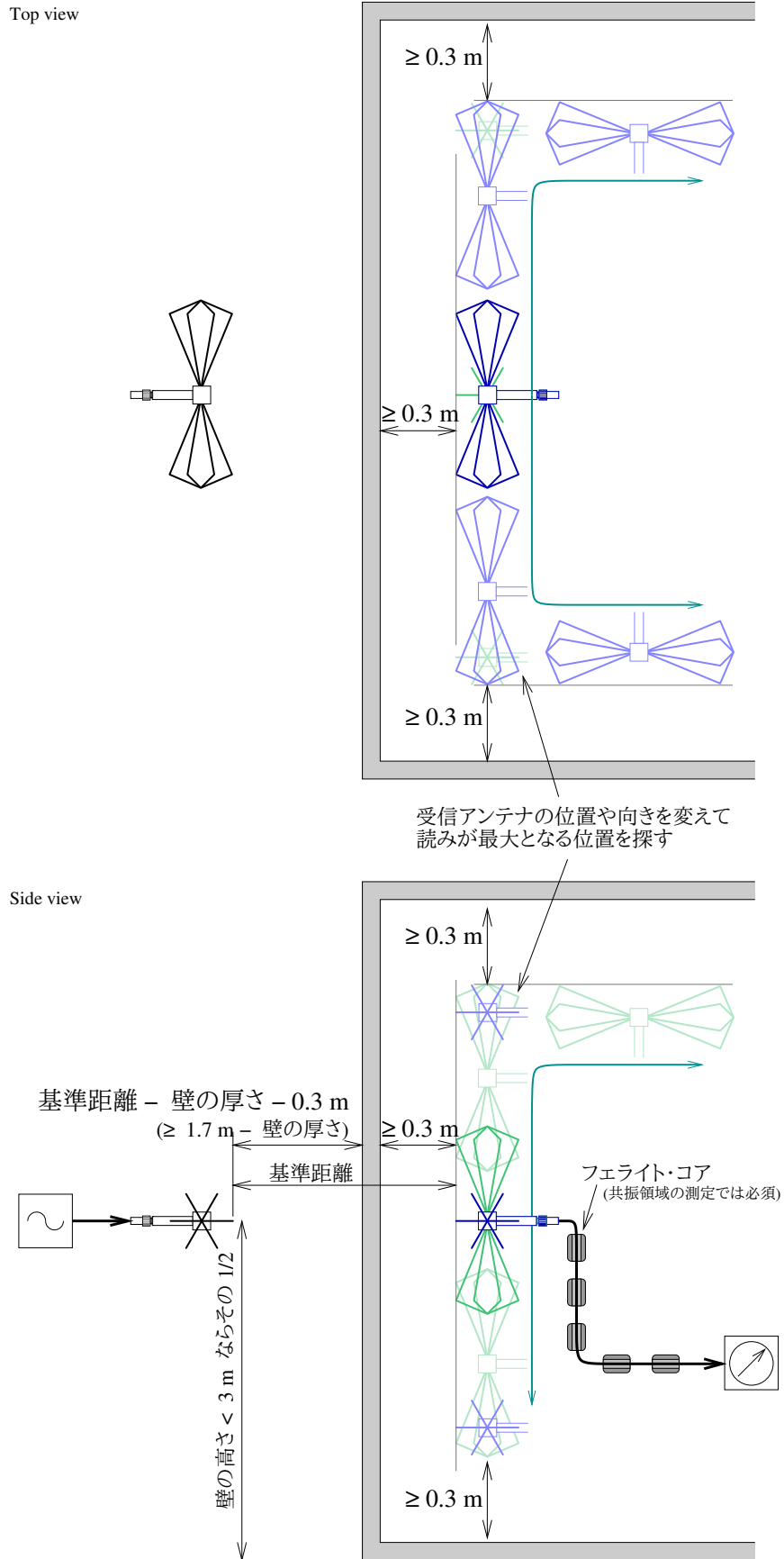
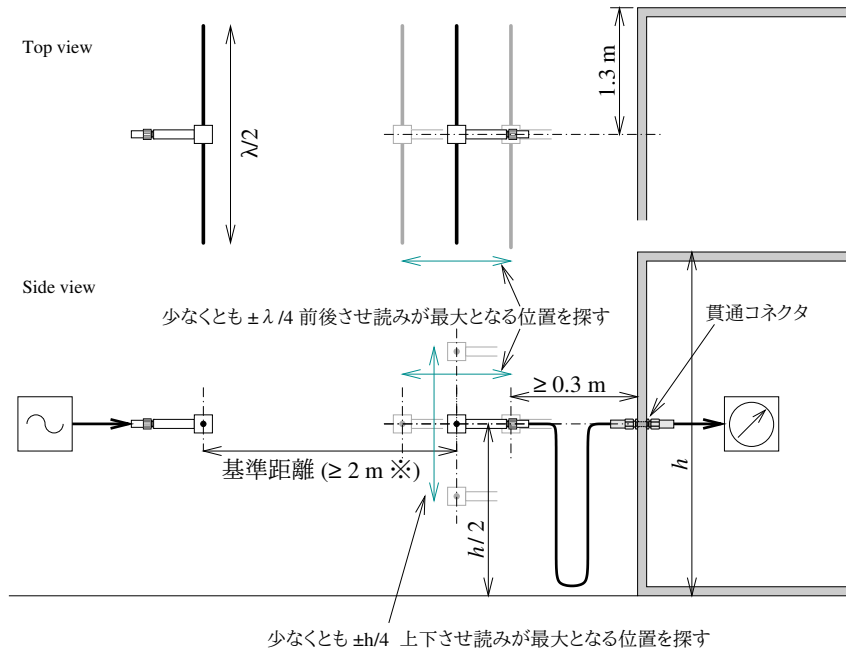
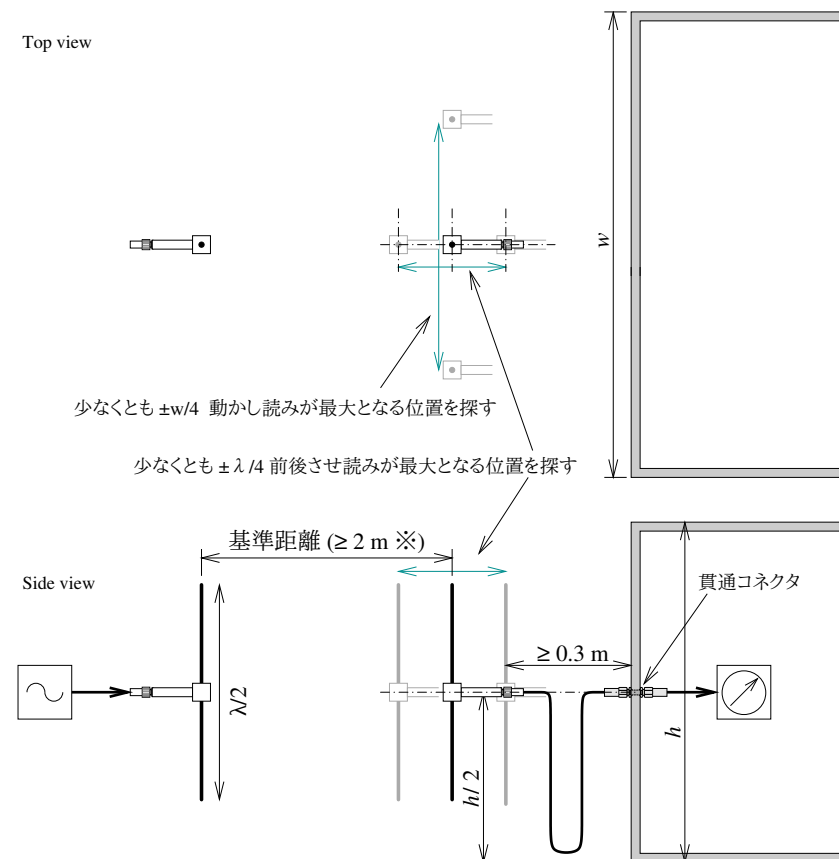


図 9: 共振領域と高周波領域の測定 — 受信アンテナの位置



※ 距離の制約から 2 m の測定距離を取れない場合は 1~2 m

図 10: 高周波領域の基準測定 (ダイポール) — 水平偏波



※ 距離の制約から 2 m の測定距離を取れない場合は 1~2 m

図 11: 高周波領域の基準測定 (ダイポール) — 垂直偏波

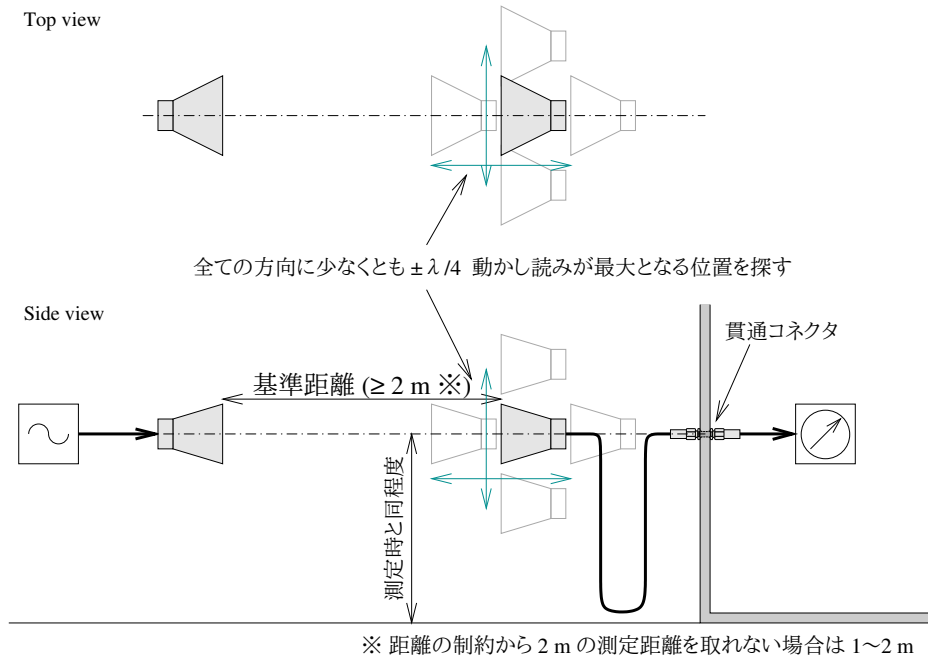


図 12: 高周波領域の基準測定 (ホーン) — 水平/垂直偏波

シールド・エンクロージャの基本共振周波数は、エンクロージャの 3 辺の大きい方 2 つを a 、及び b として、

$$f_r = 150 \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}}$$

から求められる。

3.2.2 使用アンテナ

20~100 MHz ではバイコンカル・アンテナを、100 MHz 以上では $\lambda/2$ ダイポールを使用する。

受信アンテナに接続する同軸ケーブルはフェライトで装荷されたもの (フェライトのジャケットを持つ、あるいは両端と中間にフェライト・コアを取り付けたもの) とし、少なくとも 1 m をエレメントの軸と直交するように引く。

3.2.3 測定周波数

共振領域の単一の周波数 f での評価を行なう場合、

- 空のエンクロージャは $0.9f$ 、 f 、 $1.1f$ 、
- 空でないエンクロージャは $0.8f$ 、 $0.9f$ 、 f 、 $1.1f$ 、 $1.2f$

で測定し、結果が 3 dB の幅に入らないならば最小の SE を同定するためにその周波数範囲内で追加の測定を行なうことが推奨される。

3.2.4 基準測定

双方のアンテナはエレメント間をあらかじめ決めた基準距離だけ離して対向させ、またエレメントが床や壁から 0.3 m 以上離れるように配置する。基準距離は原則として 2 m 以上とするが、距離の制約から 2 m の測定距離を確保できない場合は 1~2 m で可能な限り長い距離とする。

受信アンテナは、水平偏波では高さを少なくとも ± 0.5 m、垂直偏波では横に少なくとも ± 0.5 m 動かし、最大の読み (最小の伝播減衰量) を基準値として記録する (図 7, 図 8)。

3.2.5 エンクロージャの測定

送信アンテナを、

- 壁の高さが 3 m 未満の場合は壁の高さの 1/2 の高さ、壁の高さが 3 m 以上の場合は 2 m 以下 (測定距離を 2 m 未満とする場合は 1 m 以下) の垂直間隔の複数の高さ、
- 2.6 m 以下の水平距離毎 (測定距離を 2 m 未満とする場合は 1.3 m 以下) の水平距離毎

のそれぞれの位置に面して置いて測定を繰り返す (図 13)。

送信アンテナは、面から少なくとも 1.7 m - 壁の厚さ分だけ、また床から少なくとも 0.3 m 離し

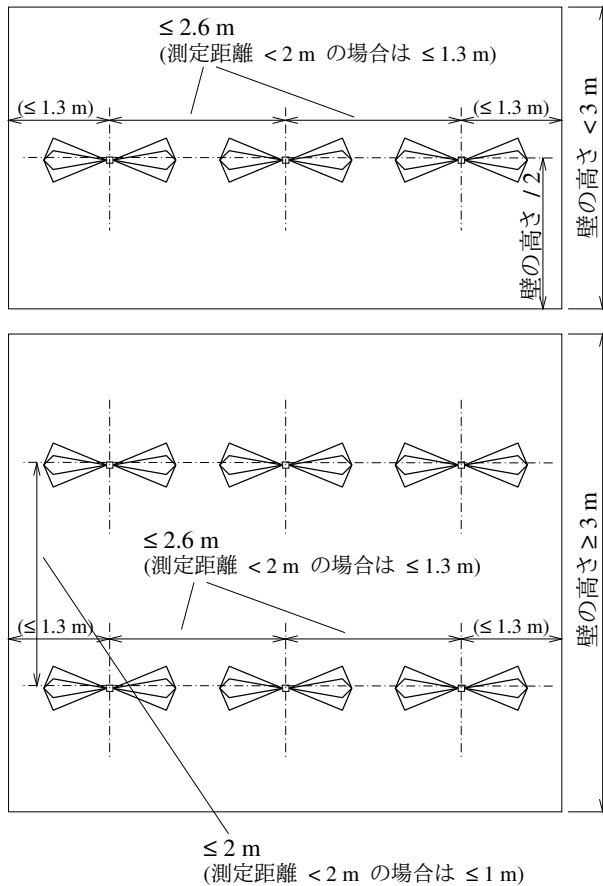


図 13: 共振領域と高周波領域の測定 — 送信アンテナの位置

て配置する。但し測定距離を 2 m 未満とする場合は送信アンテナは測定距離 - 0.3 m の位置に配置する。

受信アンテナはエンクロージャの面から少なくとも 0.3 m 離して、応答が最大となるように位置を、また可能な範囲で向きを掃引し、最大の読み (最小の伝播減衰量) を記録する (図9)。

3.3 高周波測定 (300 MHz~18 GHz)

3.3.1 使用アンテナ

標準的には 1 GHz 以下では $\lambda/2$ ダイポール・アンテナを、1 GHz 以上ではホーン・アンテナを用いる (表1) が、測定を行なう周波数に対応した直線偏波の任意のアンテナ、例えばダイポール、バイコンカル、ホーン、八木、ログ・ペリオディックなどのアンテナを用いることができる。

ダイポール・アンテナに接続する同軸ケーブルは

少なくとも 1 m をアンテナの軸と直交するように引く。

3.3.2 基準測定

双方のアンテナはエレメント間をあらかじめ決めた基準距離だけ離して対向させ、またエレメントが床や壁から 0.3 m 以上離れるように配置する。基準距離は原則として 2 m 以上とするが、距離の制約から 2 m の測定距離を確保できない場合は 1~2 m で可能な限り長い距離とする。

ダイポール・アンテナを用いる場合 ($f \leq 1\text{ GHz}$)、受信アンテナは水平偏波では高さを少なくとも $\pm h/4$ (h は壁の高さ)、また送信アンテナからの距離を少なくとも $\pm \lambda/4$ ^{†8} 動かして、垂直偏波では横に少なくとも $\pm w/4$ (w は壁の幅)、また送信アンテナからの距離を少なくとも $\pm \lambda/4$ 動かして最大の読み (最小の伝播減衰量) を基準値として記録する (図10, 図11)。

ホーン・アンテナを用いる場合 ($f > 1\text{ GHz}$)、受信アンテナは全ての方向に少なくとも $\pm \lambda/4$ 動かして最大の読み (最小の伝播減衰量) を基準値として記録する (図12)。

3.3.3 エンクロージャの測定

共振領域の測定 (§3.2.5) と同様の送受信アンテナの配置での測定を行なう。

4 参考資料

- [1] IEEE 299-2006, *IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures*
- [2] IEEE 299.1, *IEEE Standard Method for Measuring the Shielding Effectiveness of Enclosures and Boxes Having all Dimensions between 0.1 m and 2 m*
- [3] MIL-STD-285, *Method of Attenuation Measurements for Enclosures, Electromagnetic Shielding, for Electronic Test Purposes*

^{†8} $\lambda/4$ は 300 MHz では 0.25 m。

- [4] MIL-STD-1377, *Department of Defense Test Method Standard: Effectiveness of Cable, Connector, and Weapon Enclosure Shielding and Filters in Precluding Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance (Hero), Measurement of*
- [5] EN 50147-1, *Anechoic chambers — Part 1: Shield attenuation measurement*
- [6] NSA 94-106, *Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures*
- [7] エンクロージャのシールド効果の測定 — MIL-STD-285 の概要, 株式会社 e・オータマ 佐藤, 2024, <https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>