

正規化サイト・アッテネーション (NSA) の原理

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2025 年 6 月 9 日

目次

1 概要	1
2 背景	1
2.1 自由空間中での電磁波の伝播	1
2.2 大地面上の電磁波の伝播	2
2.3 測定サイト — OATS や SAC	2
2.4 OATS や SAC でのエミッション測定における受信アンテナの昇降の必要性	4
3 理論値の導出	4
3.1 受信アンテナの位置における電界強度 E_D の導出	4
3.1.1 水平偏波	4
3.1.2 垂直偏波	8
3.2 正規化サイト・アッテネーション A_N の導出	9
4 NSA による OATS や SAC の検証	10
4.1 NSA の測定	10
4.2 NSA 測定時のアンテナの位置	11
4.3 NSA の判定	12
5 補足	12
5.1 測定距離 3 m と 10 m での差	12
6 参考資料	13

1 概要

30～1000 MHz の放射エミッション測定サイトの特性の検証には、しばしば正規化サイト・アッテネーション (normalized site attenuation, NSA) が用いられる。

本稿ではその原理について解説する。後半では NSA による測定サイトの検証についても触れるが、その具体的な実施方法は本稿の主題ではない。

2 背景

2.1 自由空間中での電磁波の伝播

自由空間中、すなわち電磁波に影響を与えるようなものが何も存在しない環境では、放射が最大となる方向における送信アンテナから距離 d (m) における電力密度 P_D (W/m²) は、送信電力を P (W)、送信アンテナのゲインを G として、

$$P_D = \frac{PG}{4\pi d^2} \quad (1)$$

のように^{†1}、またその電界強度 E (V/m) は、

$$E = \frac{\sqrt{30 P G}}{d} \quad (2)$$

のように単純に表現できる。^{†2}

2.2 大地面上の電磁波の伝播

大地面上では受信アンテナには送信アンテナから直接到達する直接波以外に大地面で反射した反射波^{†3}も到達し、その位置関係 (経路長の差) によって直接波と反射波が強め合ったり弱め合ったりすることから、自由空間中での伝播 (§2.1) の場合のような単純な形で表現できなくなる。

だが、無限に広がる金属の大地面の上に水平や垂直に置かれたダイポール・アンテナ間の理論的な伝送特性は比較的容易に求めることができ (§3)、これが OATS や SAC の特性の評価の基準として用いられている。

2.3 測定サイト — OATS や SAC

30～1000 MHz の放射エミッション測定には、しばしば、§2.2で述べたような環境を近似するように意図された開放形テスト・サイト (open-area test site, OATS) や半無響室 (semi-anechoic chamber, SAC) が用いられる (図2, 図3)。

だが、現実の OATS や SAC は、有限の (またかなり不完全かも知れない) 金属大地面のみを持つ、大抵は周囲に覆いやその他の電磁波の伝播に影響するであろうものがある、等々の理由から、その特性は上記のような理想的な環境とは有意に異なったものとなるかも知れない。

この特性の違いはエミッション測定の結果に相当の影響を与える可能性があることから、OATS や SAC の特性を評価し、その OATS や SAC が正式なエミッション測定での使用に適するかどうかを判断する、体系的な方法が求められる。



図 1: かなり理想に近い環境の例 — National Physical Laboratory (UK) の高性能アンテナ校正サイト^[6]

^{†1} $4\pi d^2$ は半径 d の球の表面積。

^{†2} 自由空間のインピーダンスは 120π で、 $P_D = E^2/120\pi$ 、 $E = \sqrt{120\pi P_D}$ であるので。

^{†3} これは反射波として見る代わりに送信アンテナの鏡像からの放射として扱うこともできる。この鏡像は水平偏波の場合は反転し、垂直偏波の場合は見掛け上は反転しない^{†4} (図4, 図5)。

^{†4} 偏波による極性の反転の有無は図7～図9に示したハイト・パターンにも反映されている。



図 2: OATS の例



図 3: SAC の例

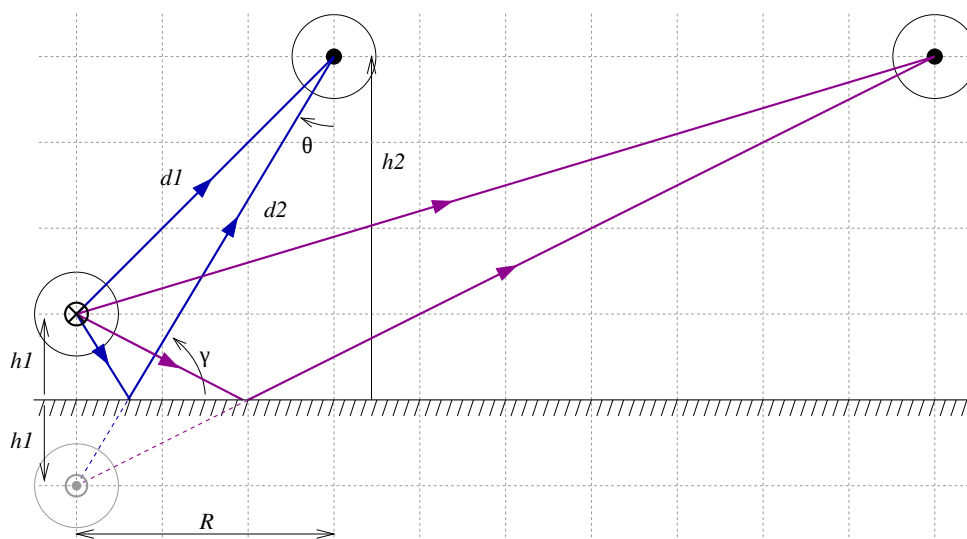


図 4: 大地面上の電磁波の伝播 — 直接波と反射波 (水平偏波)

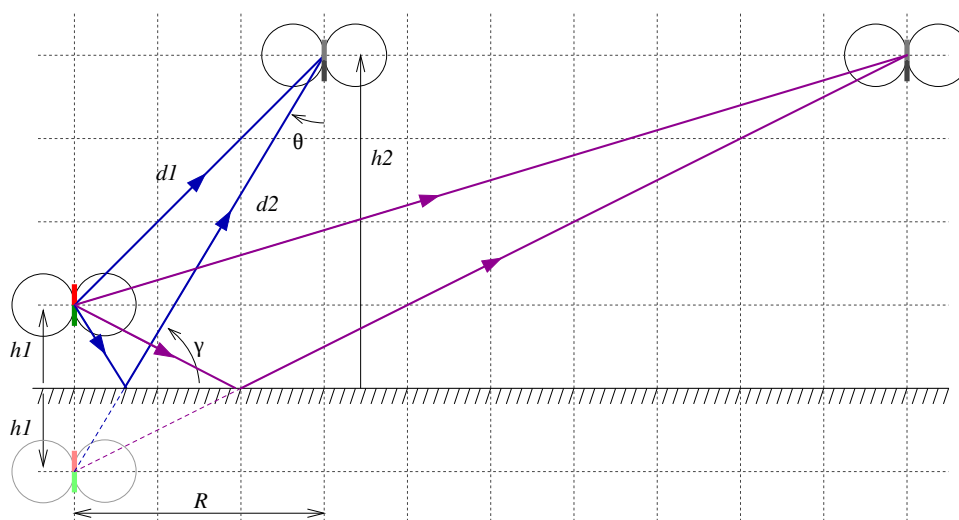


図 5: 大地面上の電磁波の伝播 — 直接波と反射波 (垂直偏波)

2.4 OATS や SAC でのエミッション測定における受信アンテナの昇降の必要性

§2.1で触れたように、OATS や SAC では受信アンテナには送信アンテナ (エミッション測定においては測定物) からの直接波以外に大地面での反射波も到達して互いに強め合ったり弱め合ったりする。このため、OATS や SAC でのエミッション測定を受信アンテナの高さを固定して行なった場合、その例を図6に示すように、エミッションの測定結果に大きな変動を生じる可能性が、そして条件によっては直接波の大半が反射波によって相殺されることで極度に低く測定される可能性も予期される。

一方、他の条件を一定として受信アンテナの高さ h_2 を変えた場合、その例を図7～図9に示すように高さ h_2 による著しい電界強度の変動 (ハイト・パターンと呼ばれる) を生じるであろうが、その最大値を測定するようにすれば上で述べたような問題は防げようである。

このため、多くの規格では、OATS や SAC での 30～1000 MHz のエミッション測定は受信アンテナの高さを規定された範囲、典型的には測定距離 10 m 以下の場合で 1～4 m の範囲で変えた時の最大の受信レベルを測定するように規定されている。

受信アンテナの高さ h_2 を 1～4 m の範囲で変えて最大値を測定した場合、図11 と図12 に例示するように依然として有意にレベルが低くなる箇所は残るかも知れないものの、このハイト・パターンの影響を大きく緩和できることが期待される。

そのような規格での測定に用いられる OATS や SAC の検証 (§4) も、エミッション測定の際と同様に受信アンテナの高さを規定された範囲で昇降させた時の最大の受信レベル (最小の減衰量) に基づいて行なわれている。

3 理論値の導出

3.1 受信アンテナの位置における電界強度 E_D の導出

3.1.1 水平偏波

水平偏波の場合、図4に示すように、

- 導電性の大地面が逆相の反射を生じると、あるいは送信アンテナと反対向きの鏡像を生じると考えることができる;
- ダイポール・アンテナは H 面内では指向性を持たず、その影響の考慮は不要となる。

ここではその導出は示さないが、一般に受信アンテナの位置における電界強度の大きさ E_H は、

h_1 (m): 送信アンテナの高さ

h_2 (m): 受信アンテナの高さ

R (m): アンテナ間の水平面上での距離

d_1 (m): 直接波の経路長で、 $d_1 = \sqrt{R^2 + (h_1 - h_2)^2}$

d_2 (m): 反射波の経路長で、 $d_2 = \sqrt{R^2 + (h_1 + h_2)^2}$

V (V): 送信アンテナに給電する 50 Ω の信号源の開放回路電圧で、整合出力電圧を V_1 とすると $V = 2V_1$

f_M (MHz): MHz で表現した周波数

AF_T (/m): 送信アンテナのアンテナ係数

AF_R (/m): 受信アンテナのアンテナ係数

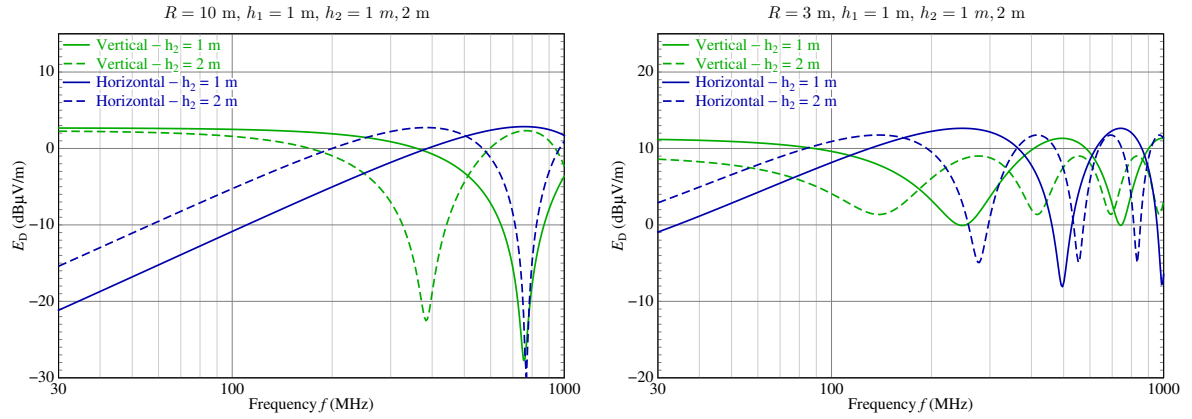


図 6: 受信アンテナの高さ (h_2) を固定とした時の E_D

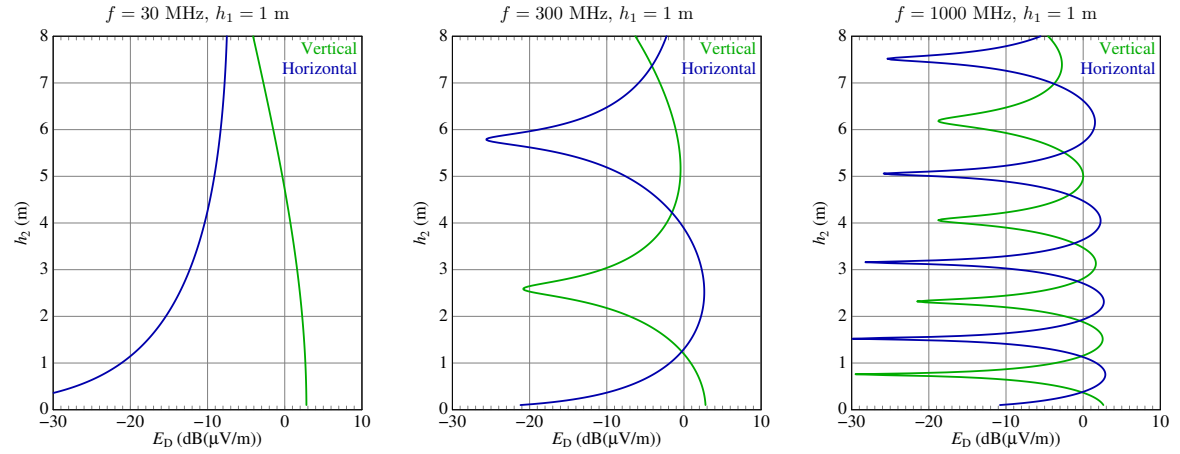


図 7: ハイト・パターン — 距離 $R = 10$ m、放射源の高さ $h_1 = 1$ m

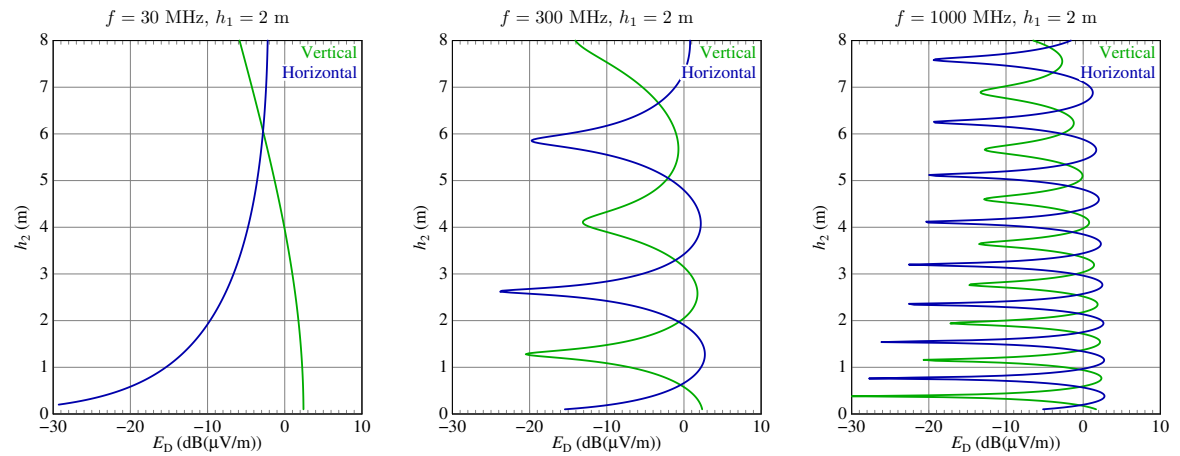


図 8: ハイト・パターン — 距離 $R = 10$ m、放射源の高さ $h_1 = 2$ m

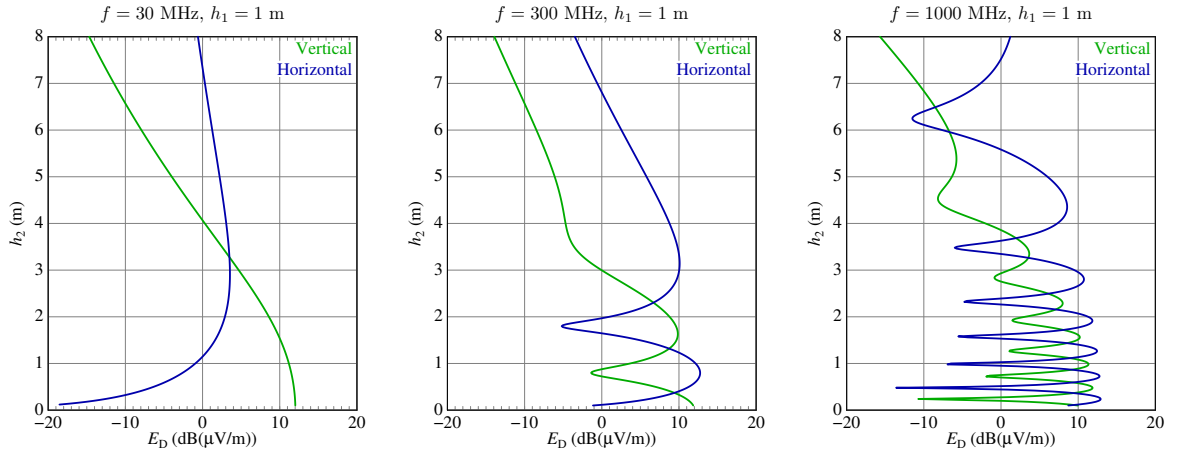


図 9: ハイト・パターン — 距離 $R = 3$ m、放射源の高さ $h_1 = 1$ m

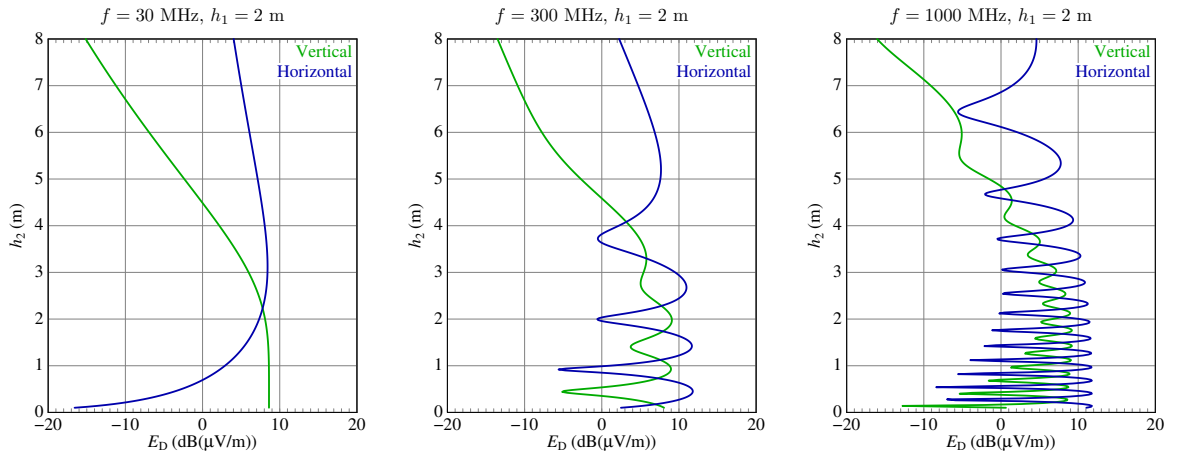


図 10: ハイト・パターン — 距離 $R = 3$ m、放射源の高さ $h_1 = 2$ m

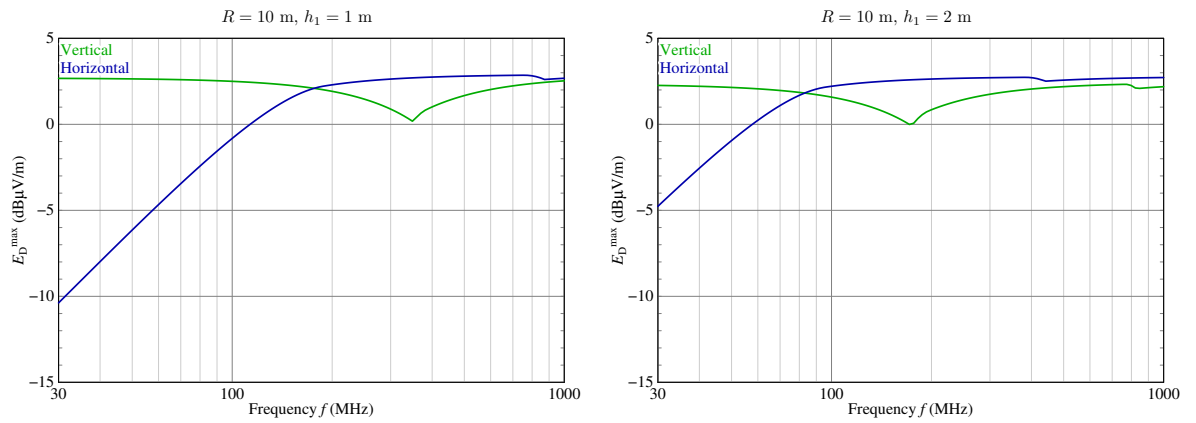


図 11: $E_D^{\max}$ ($R = 10$ m, $1 \text{ m} \leq h_2 \leq 4$ m)

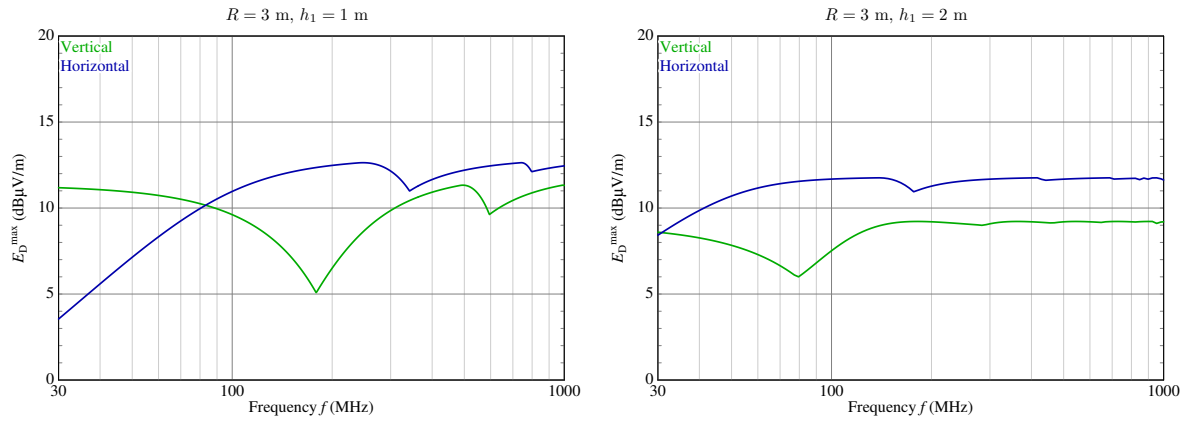


図 12: $E_D^{\max}$ ($R = 3$ m, $1 \text{ m} \leq h_2 \leq 4$ m)

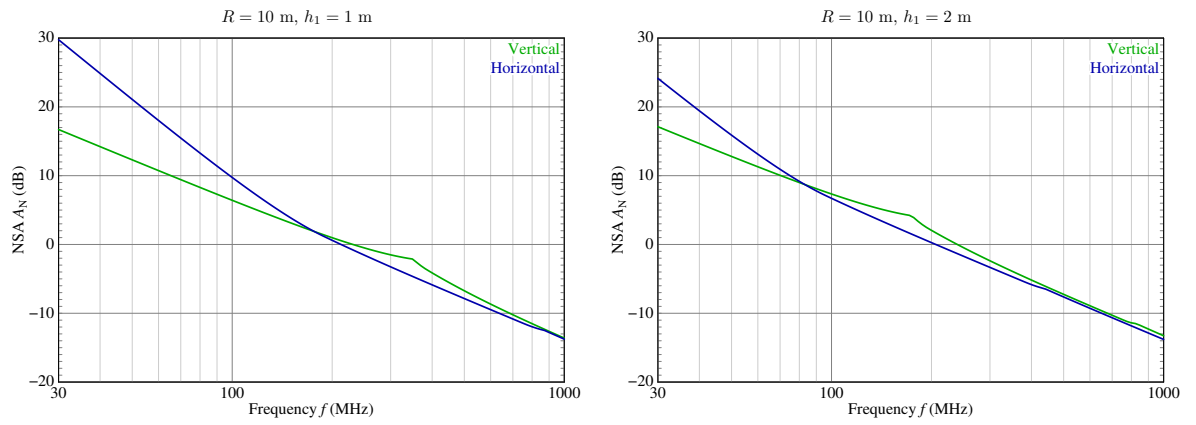


図 13: NSA の理論値 ($R = 10$ m)

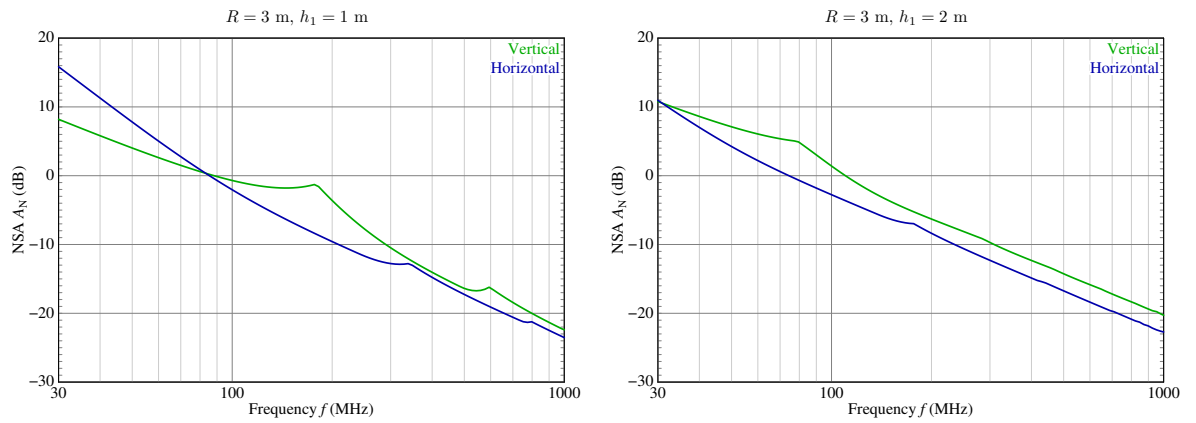


図 14: NSA の理論値 ($R = 3$ m)

ρ_h : 大地面の反射係数で、 $\rho_h = \frac{\sin \gamma - \sqrt{K - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma}}{\sin \gamma + \sqrt{K - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma}}$

ϕ_h (rad): 大地面の反射係数の位相角で、 $\rho_h = |\rho_h|e^{j\phi_h}$

γ (rad): 大地面への入射角

K : 大地面の比誘電率

σ (S/m): 大地面の導電率

β : 波数で、 $\beta = 2\pi/\lambda$

として、[5] の式 (7) にあるように、次の式で表現できる:

$$E_H = \frac{V f_M}{79.58 A F_T} \frac{\sqrt{d_2^2 + d_1^2 |\rho_h|^2 + 2d_1 d_2 |\rho_h| \cos(\phi_h - \beta[d_2 - d_1])}}{d_1 d_2} \quad (3)$$

送信アンテナのゲイン $G = 1.64$ (半波長ダイポールのゲイン)、送信アンテナへの入射電力 $P_T = 1$ pW とした場合、受信アンテナの位置での電界強度の大きさ E_{DH} は [5] の式 (8) にあるように次の式で表現できる:^{†5}

$$E_{DH} = \sqrt{49.2} \frac{\sqrt{d_2^2 + d_1^2 |\rho_h|^2 + 2d_1 d_2 |\rho_h| \cos(\phi_h - \beta[d_2 - d_1])}}{d_1 d_2} \quad (4)$$

大地面が金属面の場合、大地面での反射は位相が反転しての全反射となる、すなわち $|\rho_h| = 1$, $\phi_h = \pi$ と仮定すると、式 (4) は、

$$\begin{aligned} E_{DH} &= \sqrt{49.2} \frac{\sqrt{d_2^2 + d_1^2 + 2d_1 d_2 \cos(\pi - \beta[d_2 - d_1])}}{d_1 d_2} \\ &= \sqrt{49.2} \frac{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 - 2d_1 d_2 \cos(\beta[d_2 - d_1])}}{d_1 d_2} \end{aligned} \quad (5)$$

となり、これは ANSI C63.4a-2017^[2] の式 (D.5) と一致する。

3.1.2 垂直偏波

垂直偏波の場合、図 5 に示すように、

- 導電性の大地面が同相の反射を生じると、あるいは見掛け上は送信アンテナと同じ向きの鏡像を生じると考えることができる;
- ダイポール・アンテナは E 面内では顕著な指向性を持ち、その影響の考慮が必要となる。

微小ダイポールの場合はこの指向性 $F(\theta)$ は $F(\theta) = \sin \theta = R/d$ となり、半波長ダイポールの場合もこの式で近似できる。^{†6}

上の水平偏波の場合と同様、ここではその導出は示さないが、一般に受信アンテナの位置における電界強度の大きさ E_V は [5] の式 (12) にあるように次の式で表現できる:

$$E_V = \frac{V f_M}{79.58 A F_T} \frac{R^2 \sqrt{d_2^6 + d_1^6 |\rho_v|^2 + 2d_1^3 d_2^3 |\rho_v| \cos(\phi_v - \beta[d_2 - d_1])}}{d_1^3 d_2^3} \quad (6)$$

^{†5} 一般には $E = \sqrt{30 P G / d}$ で、 $P = 1$ pW, $G = 1.64$ とすると、 $E_{(\mu V / m)} = \sqrt{30 \cdot 1_{(pW)} \cdot 1.64 / d} = \sqrt{49.2 / d}$ となる。

^{†6} この R/d の影響で、式 (6) には式 (3) にはない R^2 が現れ、その後の式の幂も大きくなっている。

また、送信アンテナのゲイン $G = 1.64$ 、送信アンテナへの入射電力 $P_T = 1$ pW とした場合、受信アンテナの位置での電界強度の大きさ E_{DV} は水平偏波の場合と同様に [5] の式 (13) にあるように次の式で表現できる:

$$E_{DV} = \sqrt{49.2} \frac{R^2 \sqrt{d_2^6 + d_1^6 |\rho_v|^2 + 2d_1^3 d_2^3 |\rho_v| \cos(\phi_v - \beta[d_2 - d_1])}}{d_1^3 d_2^3} \quad (7)$$

大地面が金属面の場合、大地面での反射は同相のままでの全反射となる、すなわち $|\rho_h| = 1$, $\phi_h = 0$ と仮定すると、式 (7) は、

$$\begin{aligned} E_{DV} &= \sqrt{49.2} \frac{R^2 \sqrt{d_2^6 + d_1^6 + 2d_1^3 d_2^3 \cos(-\beta[d_2 - d_1])}}{d_1^3 d_2^3} \\ &= \sqrt{49.2} \frac{R^2 \sqrt{d_1^6 + d_2^6 + 2d_1^3 d_2^3 \cos(\beta[d_2 - d_1])}}{d_1^3 d_2^3} \end{aligned} \quad (8)$$

となり、これは ANSI C63.4a-2017^[2] の式 (D.6) と一致する。

3.2 正規化サイト・アッテネーション A_N の導出

式 (3) と式 (4)、また式 (6) と式 (7) より、 E (E_H と E_V) は E_D (E_{DH} と E_{DV}) を用いて次のように表現できる:

$$E = \frac{V f_M}{79.58 AF_T} \frac{E_D}{\sqrt{49.2}} = \frac{2V_I f_M}{79.58 AF_T} \frac{E_D}{\sqrt{49.2}} = \frac{V_I f_M E_D}{279.1 AF_T} \quad (9)$$

受信アンテナの高さ h_2 を規定された範囲で変えた時の E_D の最大値を $E_D^{\max \dagger 7}$ とすると、それに対応する E の最大値 $E^{\max}$ は、

$$E^{\max} = \frac{V_I f_M E_D^{\max}}{279.1 AF_T} \quad (10)$$

その時の受信アンテナの出力電圧 V_R は、アンテナ係数の定義から、

$$V_R = \frac{E^{\max}}{AF_R} = \frac{V_I f_M E_D^{\max}}{279.1 AF_T AF_R} \quad (11)$$

従って理論的なサイト・アッテネーション A は、

$$A = \frac{V_I}{V_R} = \frac{279.1 AF_T AF_R}{f_M E_D^{\max}} \quad (12)$$

これを dB で表現すると、

$$A_{(dB)} = 49.92 + AF_{T(dB)} + AF_{R(dB)} - 20 \log f_M - E_{D(dB)}^{\max} \quad (13)$$

となる。

正規化サイト・アッテネーション (NSA) の理論値 A_N (dB) は式 (13) の両辺から AF_T と AF_R を差し引いて、

$$\begin{aligned} A_N \text{ (dB)} &= A_{(dB)} - AF_{T(dB)} - AF_{R(dB)} \\ &= 48.92 - 20 \log_{10} f_M - E_{D(dB)}^{\max} \end{aligned} \quad (14)$$

とすることで得られ^{†8}、これは ANSI C63.4a-2017^[2] の式 (D.4) と一致する。

^{†7} 言うまでもなく、この max は冪を意味するものではない。

^{†8} NSA による測定サイトの検証 (§4) に際しても同様に測定された減衰量からアンテナ係数を差し引くようになっており (式 (15a), 式 (15b))、これによって異なるアンテナを用いた場合の結果を直接比較できるようにされている。

式 (5)、式 (8)、及び 式 (14) に基づいて実際に計算した NSA の理論値のカーブの例を図 13 と図 14 に示す。

ここでは測定距離 $R = 10 \text{ m}$ と 3 m 、送信アンテナ高さ $h_1 = 1 \text{ m}$ と 2 m の場合のみを示しているが、同様の方法で任意のジオメトリについての理論値を算出することができる。

4 NSA による OATS や SAC の検証

OATS や SAC の正規化サイト・アッテネーション (NSA) が理論値に近ければそのサイトの特性は上で仮定したような理想的な環境に近いと考えることができそうである。

NSA による OATS や SAC の検証の規定はいくつかの規格に含まれており、その具体的な内容は規格やその版による相違があるが、ここでは ANSI 63a-2017^[2] に基づいてその概要を述べる。

4.1 NSA の測定

NSA (正規化サイト・アッテネーション) A_N の測定は、基本的には、検証が要求されるそれぞれの偏波とアンテナ位置、またそれぞれの周波数で、

1. 受信アンテナに接続されたレシーバでの電圧の読み、 V_{Site} を測定する
2. それとあらかじめ測定しておいたアンテナを介さずにそのポイントを直結した時のレシーバでの電圧の読み、 V_{Direct} とから、減衰量 $V_{\text{Direct}} - V_{\text{Site}}$ を求める
3. その減衰量からアンテナ係数 AF_T と AF_R を差し引いて正規化サイト・アッテネーション A_N を求める

ことで行なえる。

だが、この測定では送受信アンテナ間やアンテナとグランド・プレーンとのあいだの相互結合の影響に伴うジオメトリに依存する偏差を生じることから、正規化サイト・アッテネーション A_N は次のように測定に使用するアンテナに応じて次のように測定ジオメトリ (距離、高さ、偏波) に応じた補正係数を加味して求めるように規定されている：

$$A_N = \begin{cases} V_{\text{Direct}} - V_{\text{Site}} - AF_T - AF_R - \Delta AF_{\text{TOT}} & (\text{同調ダイポールの場合}) \\ V_{\text{Direct}} - V_{\text{Site}} - AF_T - AF_R - GSCF & (\text{その他の全てのアンテナの場合}) \end{cases} \quad (15a)$$

但し、

ΔAF_{TOT} (dB): 相互インピーダンス補正係数

$GSCF$ (dB): geometry-specific correction factor

ほとんどの場合、OATS や SAC の検証では広帯域アンテナが用られ、従って $GSCF$ を含む式 (15b) の式が適用されるであろう。

ここでは詳細は述べないが、 $GSCF$ は ANSI C63.5^[3] にあるように所定の寸法のバイコニカル・アンテナについては ANSI C63.5 で示された値を使用でき、その他の場合は ANSI C63.5 で規定されているようにアンテナ校正サイトにおけるそれぞれのジオメトリについての測定の結果から算出することができる。^{†9†10}

^{†9} 広帯域アンテナのアンテナ係数 (AF_T と AF_R) もアンテナ校正サイトで ANSI C63.5 標準サイト法 (SSM) で測定される。このため、そのアンテナ校正サイトの特性がそのアンテナを用いて行なわれた NSA 測定の結果にもそのまま反映されることになる (理論値との比較という形は取っているものの、実際上、この NSA 評価はアンテナ校正サイトとの直接的な比較に近いものとなる) ため、良好な NSA 測定のためには良質なアンテナ校正サイトで適切に校正されたアンテナを用いることが非常に重要となるだろう。

^{†10} この補正を行なった結果はアンテナ校正サイトでのそれぞれのジオメトリで得られたアンテナ係数を用いた結果に相当するものとなるだろう。

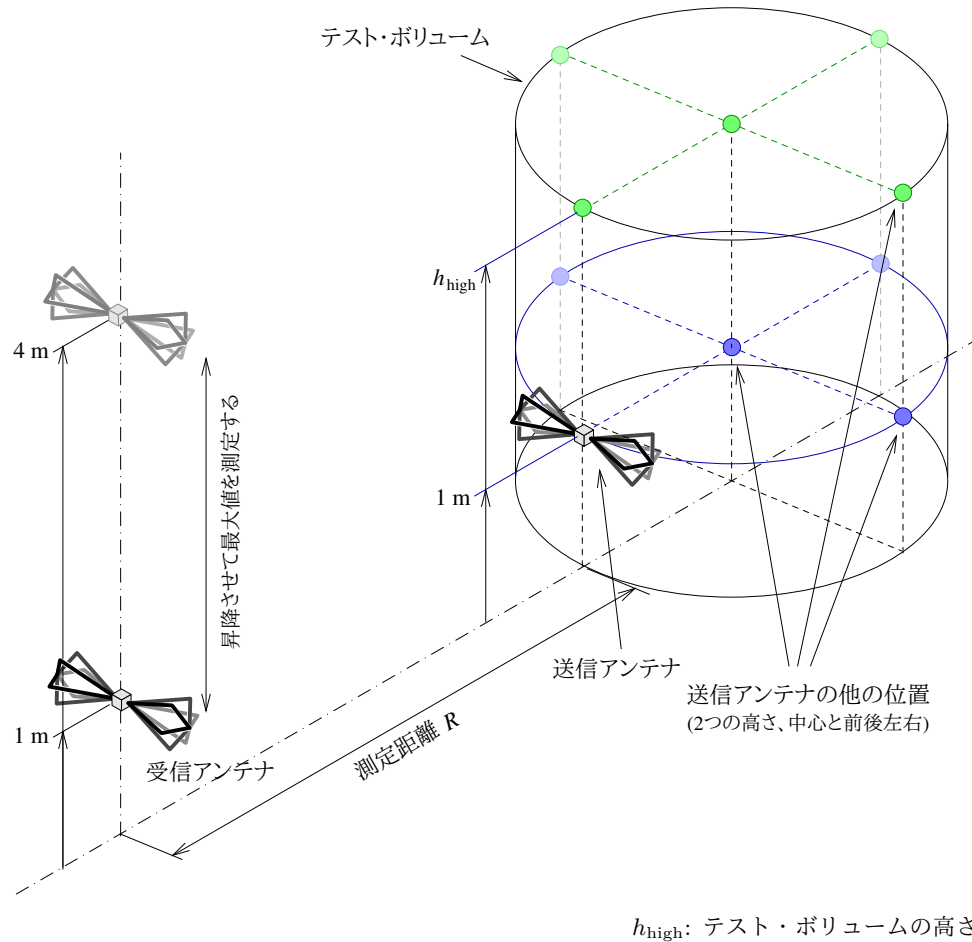


図 15: NSA 測定でのアンテナ位置 — 水平偏波

4.2 NSA 測定時のアンテナの位置

NSA の測定は、送信アンテナを検証を行なうテスト・ポリウム (試験時に EUT システムが置かれる範囲を包含する円筒状の領域) の中心、及び前後左右の、

- 高さ 1 m、及び
- テスト・ポリウムの高さに応じて、
 - 水平偏波の場合はテスト・ポリウムの上端
 - 垂直偏波の場合はその 0.5 m 下と高さ 1.5 m のいずれか高い方

のそれぞれに、また受信アンテナを送信アンテナから所定の測定距離 R だけ離れた位置に互いに向き合うように配置した状態で行なう (図 15, 図 16)。

ここでは触れないが、この送信アンテナの位置は、テスト・ポリウムの大きさ、電波吸収体などからの距離などに応じて減らせる場合もある。

いずれの場合も、受信アンテナは規定された範囲 (1~4 m) で昇降させ、最大の受信レベルを NSA の算出に用いる。

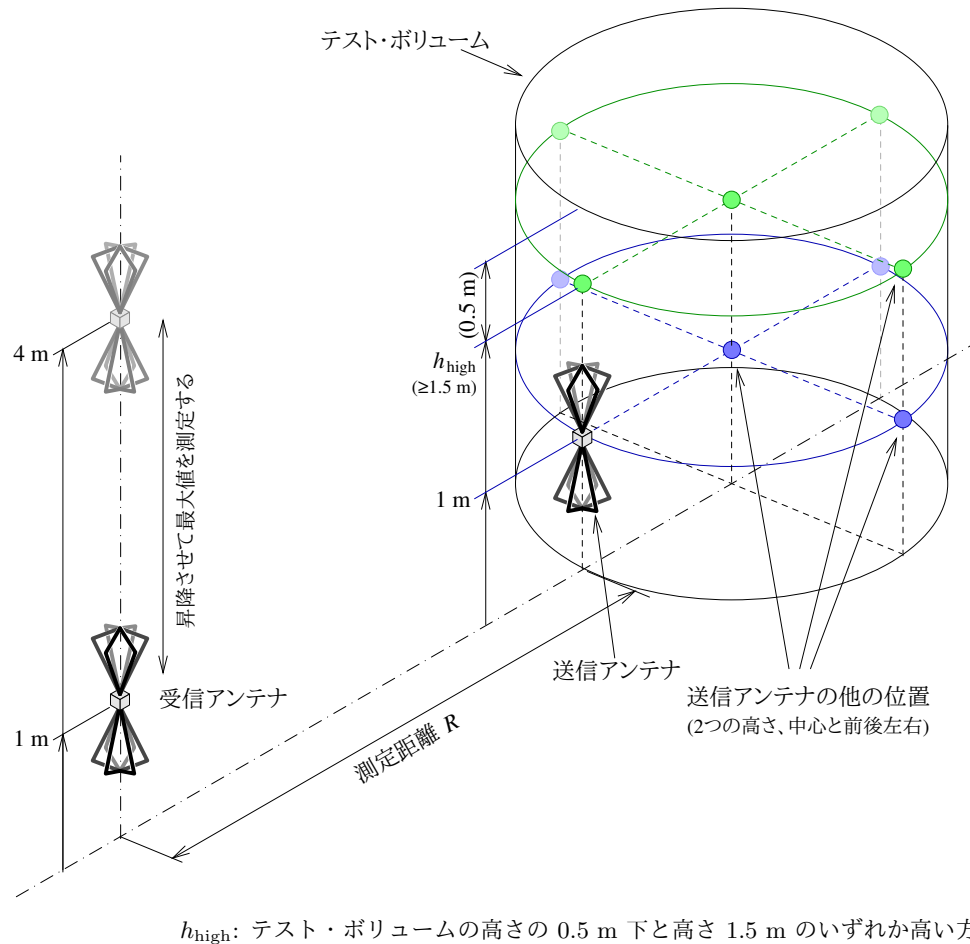


図 16: NSA 測定でのアンテナ位置 — 垂直偏波

4.3 NSA の判定

全ての送信アンテナ位置で測定された NSA が理論値の ± 4 dB を超えないならばそのサイトは受け入れ可能と判断できる。

また、測定された NSA の理論値からの偏差の情報はそのサイトの不完全さの指標として用いられるであろう。

5 補足

5.1 測定距離 3 m と 10 m での差

測定距離 3 m と 10 m での測定の相関について、また良く用いられる $1/d$ の減衰を仮定した単純な外挿や測定距離 3 m と 10 m での 10 dB の違いの仮定の適切さについて知りたいと思うことがあるかも知れない。これは本稿のテーマではないが、上の理論値に基づいた簡単な説明を行なう。

実際のエミッション測定ではこれよりも複雑となるであろうものの、単純には、測定距離 R について求められた E_D^{max} はその測定距離 R で測定されるであろうエミッションのレベルを反映すると考えられる。

この仮定に基づくと、 $R = 10$ m と $R = 3$ m について求めた E_D^{max} をグラフ化した図 11 と図 12 を比較すればわかるであろうように、またその差を示した図 17 を見ればよりはっきりとわかるであろうように、測定距離 3 m と 10 m でのエミッション測定結果のあいだにはそのような単純な関係はなさそうである。

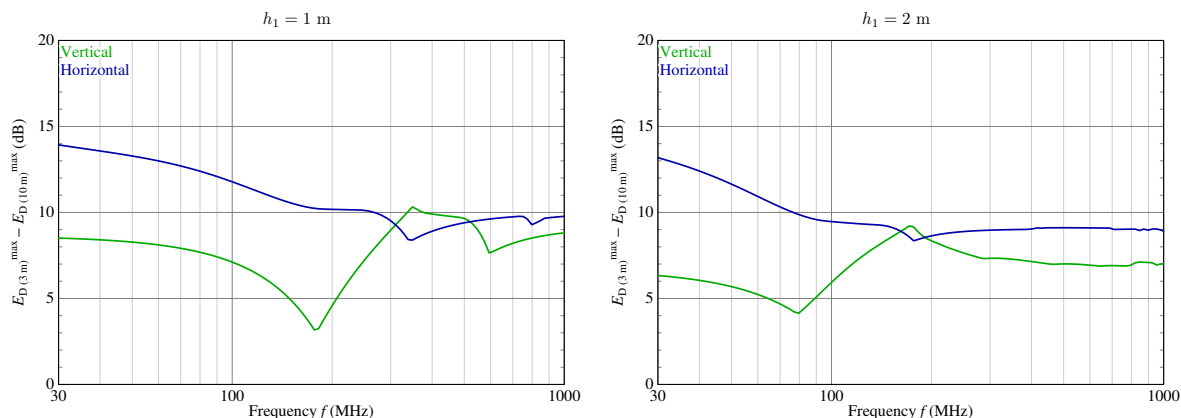


図 17: 3 m と 10 m での $E_D^{\max}$ の差分 ($E_{D(3m)}^{\max} - E_{D(10m)}^{\max}$, $1 \text{ m} \leq h_2 \leq 4 \text{ m}$)

この推定では、特に垂直偏波でそれらのあいだの差が 10 dB よりもかなり小さくなる傾向があることが目に付くだろう。

従って、適用する規格が $1/d$ の減衰や測定距離 3 m と 10 m での 10 dB の差を仮定しての換算を許容している、あるいは測定距離 3 m と 10 m で 10 dB 異なる限度値を規定しているような場合はその規格で定められた制限^{†11}の範囲内でその規定を適用するのは正当であるとしても、異なる測定距離での測定結果のあいだの良好な相関を期待すべきではなさそうである。特に、3 m での測定の結果が $1/d$ の減衰や 10 dB の差を仮定して換算した限度値を超えなかったとしても、それに基づいて 10 m での測定でも限度値を超えないであろうと考えるのは安全ではないだろう。

6 参考資料

- [1] ANSI C63.4-2014, *American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz*
- [2] ANSI C63.4a-2017, *American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz — Amendment 1: Test Site Validation*
- [3] ANSI C63.5-2017, *American National Standard for Electromagnetic Compatibility — Radiated Emission Measurements in Electromagnetic Interference (EMI) Control — Calibration and Qualification of Antennas (9 kHz to 40 GHz)*
- [4] CISPR 16-1-4, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods — Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus — Antennas and test sites for radiated disturbance measurements*
- [5] *Calculation of Site Attenuation From Antenna Factors*, Albert A. Smith JR, et al., IEEE, 1982
- [6] *Measurement Good Practice Guide No. 73: Calibration and use of antennas, focusing on EMC applications*, M J Alexander et al., National Physical Laboratory, Teddington, UK, 2004,
<https://eprintpublications.npl.co.uk/3520/1/mgpg73.pdf>

^{†11} 例えば試験対象のシステムの大きさに制限があることがある。