

ANSI C63.5 の概要 — エミッション測定用のアンテナの校正

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2024 年 5 月 20 日

目次

1	概要	2
2	アンテナの校正法	2
3	一般	3
3.1	アンテナ係数	3
3.2	自由空間アンテナ係数と準自由空間アンテナ係数	3
3.2.1	30~1000 MHz	3
3.2.2	1~40 GHz	3
3.3	GSCF (geometry-specific correction factor)	3
3.4	対称性の確認	4
3.5	アンテナのセットアップ	5
3.6	アンテナ校正サイト (ACS)	6
3.6.1	一般	6
3.6.2	30~1000 MHz における ACS に対する追加の要求	6
3.6.3	ACS のバリデーションの要求	7
3.6.4	サイト減衰量の統計基準	7
4	標準サイト法 (SSM)	8
4.1	30~1000 MHz	8
4.1.1	E_D^{\max}	9
4.2	1~40 GHz	10
4.2.1	E_D^{\max}	12
4.3	補足説明 — アンテナ係数の算出	12
5	参照アンテナ法 (RAM)	13
6	等価容量置換法 (ECSM)	14
6.1	ダミー・アンテナ	15
7	参考資料	16



National Physical Laboratory (UK) の高性能アンテナ校正サイト [6]

1 概要

エミッション測定用アンテナのアンテナ係数の測定 (校正) には、しばしば ANSI C63.5 が用いられる。これはアメリカの国家規格であり、アメリカ向けの電子/電気機器の多くの評価で用いられる ANSI C63.4^[2] から明示的に参照されている^{†1}他、アンテナ校正法を定める IEC/CISPR 規格がなかった^{†2}こともあってアンテナの校正法が明確に規定されていない様々な規格に基づくエミッション測定で用いるためのアンテナの校正にも広く用いられてきた。

今は国際規格である CISPR 16-1-6^[5] があり、少なくとも IEC/CISPR 規格やそれに基づく規格の多くではアンテナ校正に関してはその規格を用いることができるであろうが、アメリカの FCC 規則に関連しては ANSI C63.5 の適用が求められるままとなるであろう。

本稿では ANSI C63.5 の最新版である ANSI C63.5-2017 で直接規定されている標準サイト法 (SSM)、参照アンテナ法 (RAM)、及び等価容量置換法 (ECSM) について、その概要を説明する。

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、正確な情報は規格そのもの^[1] や関連する公式な文書を参照されたい。

2 アンテナの校正法

ANSI C63.5-2017 には以下のアンテナ校正法が含まれる:

- 標準サイト法 (standard site method; SSM) — §4
- 参照アンテナ法 (reference antenna method; RAM) — §5
- 等価容量置換法 (equivalent capacitance substitution method; ECSM) — §6
- IEEE Std 291-1991 より、
 - 標準放射ループ法 (standard transmit loop method; STLM)
 - 標準アンテナ法 (standard antenna method; SAM)
 - 標準電磁界法 (standard field method; SFM)

アンテナの種類	製品測定用アンテナ				NSA 測定用アンテナ		
	5 章 SSM	6 章 RAM	7 章 ECSM	Annex	5 章 SSM	6 章 RAM	Annex
モノポール・アンテナ			✓				
同調ダイポール・アンテナ	✓	✓		Annex F (ΔAF)	✓	✓	Annex F (ΔAF)
バイコニカル・アンテナ	✓	✓		Annex G (ΔAF)	✓	✓	Annex G (ΔAF), I (GSCF)
LPDA	✓				✓		Annex I (GSCF)
ハイブリッド・アンテナ	✓						
ホーン・アンテナ	✓						

ΔAF : 自由空間補正係数

GSCF: geometry-specific correction factor

LPDA: log-periodic dipole arrays

ハイブリッド・アンテナ: BiLog[®] などの、広帯域ダイポールと LPDA を組み合わせたアンテナ

表 1: ASC C63 測定法での使用のためのアンテナ校正法

^{†1} また、CISPR 32:2015 も ANSI C63.5-2006 を参照していたが、この参照は CISPR 32:2015/A1:2019 で CISPR 16-1-6:2014 に変更された。

^{†2} 2014 年に CISPR 16-1-6 ed. 1^[5] として発行された。

3 一般

3.1 アンテナ係数

アンテナ係数 (antenna factor) はアンテナの偏波の方向の電界強度 E (V/m) とアンテナに接続された負荷に誘起される電圧 V_o (V) の比率 E/V_o (1/m) で、デシベルでは $20 \log(E/V_o)$ (dB(1/m))^{†3} で表現される。

エミッション測定においては、アンテナの出力で測定された電圧 V_o (dB μ V) にアンテナ係数 AF (dB(1/m)) を加えることでアンテナが受けている電界強度 E (dB(μ V/m)) を得ることができる。

3.2 自由空間アンテナ係数と準自由空間アンテナ係数

3.2.1 30~1000 MHz

通常、30~1000 MHz の周波数範囲での校正は標準サイト法 (SSM; §4) によって、あるいは同調ダイポール・アンテナやバイコニカル・アンテナについては参照アンテナ法 (RAM; §5) によって行なうことができる (表1)。いずれの方法での測定もグラウンド・プレーンを持つアンテナ校正サイト (§3.6) で行なわれるが、自由空間アンテナ係数 (free-space antenna factor; FSAF) に近い準自由空間アンテナ係数 (near-free-space antenna factor; NFSAF) を得ることができる。

但し、この規格では同調ダイポール・アンテナについては Table F.1 で、またバイコニカル・アンテナについては Table G.1 で自由空間補正係数 ΔAF が示されており、標準サイト法や参照アンテナ法で得られた準自由空間アンテナ係数 AF_{NFS} から自由空間補正係数 ΔAF を差し引いて自由空間アンテナ係数 $AF_{FS} = AF_{NFS} - \Delta AF$ を求め、これを測定に用いることになっている。

LPDA やハイブリッド・アンテナについては自由空間補正係数 ΔAF の規定はなく、標準サイト法で得られた準自由空間アンテナ係数 AF_{NFS} がそのまま測定に用いられる。

標準サイト法 (§4) や参照アンテナ法 (§5) は測定距離 10 m での測定に基づくが、これらの方法で得られたアンテナ係数は測定距離と無関係に適用される。

但し、NSA (正規化サイト・アッテネーション) の測定では、同調ダイポールについては相互インピーダンス補正係数 ΔAF_{TOT} ^{†4}、広帯域アンテナについては GSCF (geometry-specific correction factor; §3.3) による補正が必要となる。

3.2.2 1~40 GHz

1~40 GHz の周波数範囲の校正は自由空間条件での標準サイト法 (§4.2) で行なわれ、遠方界での校正では任意の測定距離で適用可能な自由空間アンテナ係数を得られるとみなすことができる。

3.3 GSCF (geometry-specific correction factor)

30~1000 MHz の周波数範囲の通常の測定のためのアンテナ係数としては、測定のジオメトリ (測定距離、アンテナ高さ、偏波) に関わらず、校正で得られた準自由空間アンテナ係数に自由空間補正係数 ΔAF を適用した自由空間アンテナ係数が、但し自由空間補正係数が規定されていない場合は準自由空間アンテナ係数がそのまま用いられる (§3.2)。

^{†3} “dB(1/m)” は、正確な表現とは言い難いがしばしば “dB/m” のように表記される。

^{†4} ANSI C63.4-2014 [2] Annex D 参照。

だが、NSA (正規化サイト・アッテネーション) の評価においては、自由空間アンテナ係数や準自由空間アンテナ係数を用いただけでは測定のジオメトリの違いが無視できない影響を与えるため、ジオメトリに対する補正が必要となる。

この補正は、同調ダイポールを用いた場合は ANSI C63.4^[2] で示されているそれぞれのジオメトリに対する相互インピーダンス補正係数 ΔAF_{TOT} を適用して

$$A_N = V_{\text{direct}} - V_{\text{site}} - AF_T - AF_R - \Delta AF_{TOT}$$

のように、また特定の寸法のバイコンカル・アンテナを用いた場合はこの規格の Table G.2 と G.3 で示されているそれぞれのジオメトリに対する GSCF (geometry-specific correction factor) を適用して

$$A_N = V_{\text{direct}} - V_{\text{site}} - AF_{T,FS} - AF_{R,FS} - GSCF$$

のように行なう。^{†5}

その他のアンテナを用いた場合、この規格の Annex I で述べられているように、それぞれのジオメトリでの標準サイト法でのサイト減衰量測定に基づいて、準自由空間ジオメトリ ($R = 10 \text{ m}$, $h_1 = 2 \text{ m}$, $h_1 = 1 \sim 4 \text{ m}$ の掃引) で測定されたサイト減衰量 A_{NFS} と NSA 評価が行なわれるそれぞれのジオメトリで測定されたサイト減衰量 A_{GS} (またそれぞれのジオメトリに対して求められた E_D^{max}) から、

$$GSCF = (E_{D,GS}^{\text{max}} + A_{GS}) - (E_{D,NFS}^{\text{max}} + A_{NFS})$$

のように GSCF を求め、

$$A_N = V_{\text{direct}} - V_{\text{site}} - AF_{T,NFS} - AF_{R,NFS} - GSCF$$

のように補正を行なう。^{†6†7}

3.4 対称性の確認

1. バイコンカル・アンテナやハイブリッド・アンテナ^{†8}の対称性は、30~300 MHz の周波数範囲について、30~200 MHz は 1 MHz 以下、200~300 MHz は 5 MHz 以下の周波数ステップで確認する。
2. アンテナの偏波は垂直偏波、アンテナ間の距離は 10 m、評価対象のアンテナ (受信アンテナ) のグラウンド・プレーンからの高さは 1 m とし、校正の際と同様にケーブルを接続する (図 1, §3.5)。
3. 送信アンテナを高さ 1~4 m で走査し、最大の応答を記録する。
4. セットアップを同一のままとして評価対象のアンテナを 180° 回転 (上下を反転) させ、同様に最大の応答を記録する。
5. 全ての測定周波数についてそれらの 2 回の測定結果の差を求め、その差が 1.0 dB 以下であることを確認する。

^{†5} バイコンカル・アンテナに対しては自由空間補正係数 ΔAF (Table G.1) を適用した上で GSCF (Table G.2, G.3) を適用するようになっているが、Table G.2 で示されている準自由空間ジオメトリ (水平偏波、測定距離 $R = 10 \text{ m}$, $h_1 = 2 \text{ m}$ で、この条件についてはジオメトリ補正は不要となる筈) に対する GSCF が $2 \cdot \Delta AF$ となっていることからわかるように、実質的には GSCF を適用した時にはこの自由空間補正の効果は打ち消されるようになっている。

^{†6} この場合は自由空間補正係数 ΔAF の適用はない。

^{†7} このようにして求められた GSCF を用いた NSA の評価は、実質的には理論値との比較ではなくアンテナ校正サイト (アンテナ係数と GSCF の測定に用いられたサイト) で同一のジオメトリで測定されたサイト減衰量との直接の比較となる。

^{†8} ANSI C63.4-2014^[2] N.1 の Condition B ではハイブリッド・アンテナが以下の条件を満たすことが求められている: (1) VSWR が 2.5:1 以下であること、(2) 対称性が $\pm 1 \text{ dB}$ 以下であること、(3) N.2 で示された大きさの制限を満足すること、(4) 標準サイト法での校正、VSWR の測定、及び対称性の測定が ISO/IEC 17025 認定校正試験所で行なわれていること。

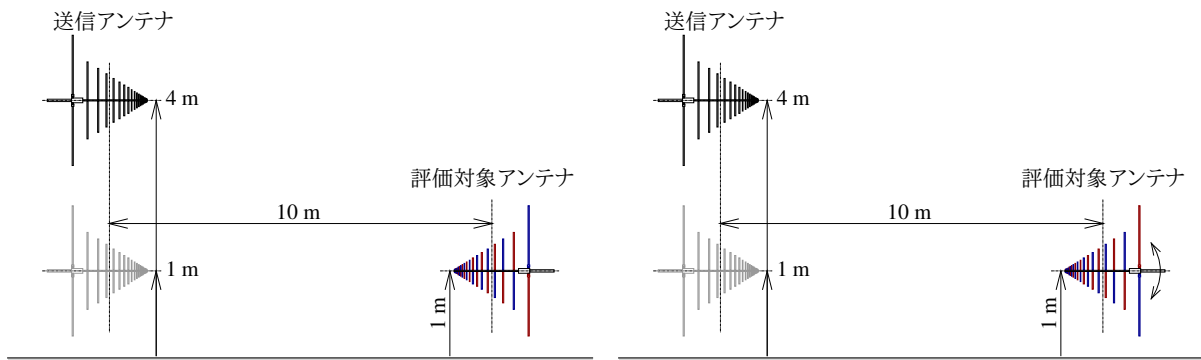


図 1: 対称性の確認

3.5 アンテナのセットアップ

- アンテナの VSWR が 2:1 を超える場合はアッテネータを使用する。

また、少なくとも標準サイト法については、送受信アンテナ双方にその VSWR とは無関係に反射減衰量が 15 dB よりも大きい 10 dB のアッテネータを接続するように定められている。^{†9}

- ダイポール、バイコニカル、あるいはハイブリッド・アンテナについては、放射素子との結合に伴いケーブルに誘導される電流を低減するコモン・モード・チョークとして、損失性のフェライト・コアを送受信アンテナ双方のケーブル少なくとも 1 m に (GSCF の測定では送信アンテナ・ケーブルに対しては 4 m、受信アンテナ・ケーブルに対しては 6 m よりも長い範囲で、おおよそ 20 cm 毎に) 取り付ける。

ケーブルの影響はケーブルをある程度離れた位置まで放射素子に直交するように (アンテナの後方に水平に) 引くことでも低減でき、少なくとも標準サイト法については、ケーブルを少なくとも 1 m (GSCF の測定では少なくとも 2 m) はアンテナの後方に引くことも定められている。

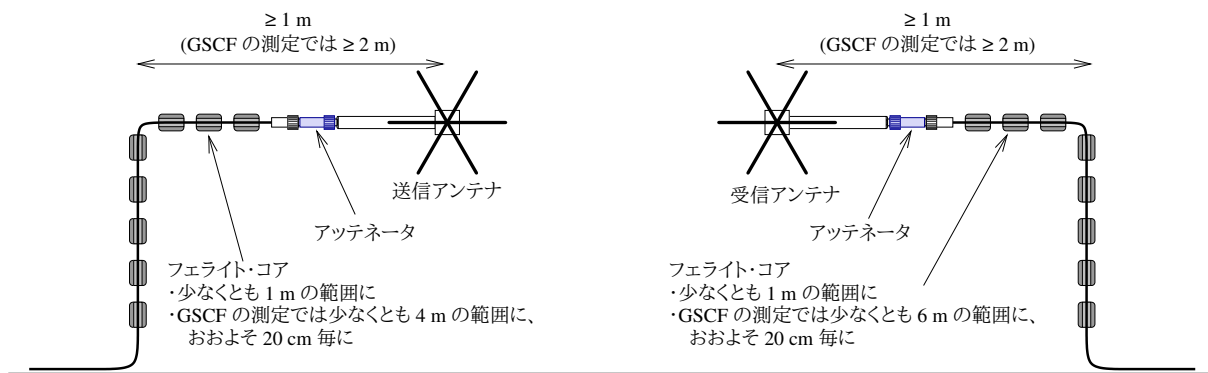


図 2: アンテナのセットアップ

- 信号源はレシーバの入力でノイズ・レベルよりも少なくとも 16 dB 高い信号を得るために十分な電力を与えるものとする。

S/N 比の改善のため、より狭い IF 帯域幅の使用、アベレージング、あるいは送信側への増幅器の追加や受信側への低雑音プリアンプの追加 (無線サービスや近傍の敏感な機器への干渉の防止のため、受信側へのプリアンプの追加の方が望ましい) を行なっても良い。

^{†9} バイコニカル・アンテナやハイブリッド・アンテナは低い周波数で著しく整合が悪化するが、10 dB の良質な (整合の良い) アッテネータを入れれば VSWR を 1.2:1 程度以下まで下げることができる。

- アンテナの基準位置は:
 - － ダイポール・アンテナ、バイコンカル・アンテナ — エレメントの中心
 - － LPDA、ハイブリッド — エレメントの間中点^{†10}
 - － ホーン・アンテナ — 開口面

3.6 アンテナ校正サイト (ACS)

標準サイト法 (§4) や参照アンテナ法 (§5) での校正は次のような条件を満たすアンテナ校正サイト (antenna calibration site; ACS) で行なう。

3.6.1 一般

1. ACS はそのようなサイト検証に関して ISO/IEC 17025:2005 で認定された組織によって評価されること。
2. サイトには測定の実施に必要なもの以外の反射面がないこと。
3. 製品測定に用いられるサイトは ANSI C63.5-2017 J.2.2 で述べられた条件を満たさない限りはアンテナ校正には用いないこと。
4. 測定中の温度変化は 5°C 以内であること。計測器は結果に影響しないこと。
5. 推奨 16 dB の S/N 比の達成のため、比較的低い外来雑音レベルが推奨される。
6. サイト減衰量が理想に近いこと (偏差が小さいこと) も推奨される。

3.6.2 30~1000 MHz における ACS に対する追加の要求

前項の条件に加え、30~1000 MHz の周波数範囲では ACS は以下の要求に適合すること:

1. ACS はいかなる雨風除けの覆いも持たない OATS (open-area test site) であること。
2. グランド・プレーンは 3 cm (1000 MHz における $\lambda/10$) よりも大きい穴やギャップのない金属製のものであること。
3. グランド・プレーンは電氣的に連続で、平坦である (例えば ± 3 cm 以下の非平坦性) こと。グラウンド・プレーンの全ての溶接や継ぎ目は乱れたものとすべきである。
4. グランド・プレーンは試験距離に対するフレネル楕円を包含すること。^{†11}
送受信アンテナは楕円の焦点に置かれる。

^{†10} あらかじめマーキングされていない場合、校正に先立って該当箇所に明確にマーキングを行なっておくと良いだろう。

^{†11} ANSI C63.5-2006 の SACS (standard antenna calibration site) に対する要求と比較すると、グラウンド・プレーンの最小限の大きさが 20 × 30 m 以上から試験距離に対するフレネル楕円に縮小され、グラウンド・プレーンの縁から 10 m 以内に木やその他の物体がないことという要求は削除されている。だが、アンテナ校正においてアンテナ校正サイトの特性は非常に重要 (特に標準サイト法ではアンテナ校正サイトの伝播特性が校正結果に直接影響する) であり、良好な特性を得るためには ANSI C63.5-2006 の SACS のように大きなグラウンド・プレーンとクリア・エリアを持つサイトの使用が望ましそうに思われる。例えば NPL (UK)、NIST (USA)、Liberty Lab. (USA) などのサイトは 60 × 30 m のグラウンド・プレーンを持ち、規格の要求を上回る非常に良好な特性を達成している。^[6]

3.6.3 ACS のバリデーションの要求

ACS の評価は 30~1000 MHz と 1~40 GHz の 2 つの周波数範囲に分けられる。

1. 30~1000 MHz:

- (a) サイトは §3.6.2 で触れた構造上のガイドラインに適合すること。
- (b) NSA の測定は、そのサイトでのアンテナ校正に用いられる、準自由空間ジオメトリ (すなわち $R = 10 \text{ m}$ 、 $h_1 = 2 \text{ m}$ 、 $h_2 = 1 \sim 4 \text{ m}$ の掃引) の 5 箇所から成るボリュームで行なう。そのボリュームの半径 r は校正試験所が規定するが、校正対象アンテナが収まるのに十分な大きさでなければならない、また少なくとも $r \geq 1.5 \text{ m}$ でなければならない (図 3)。

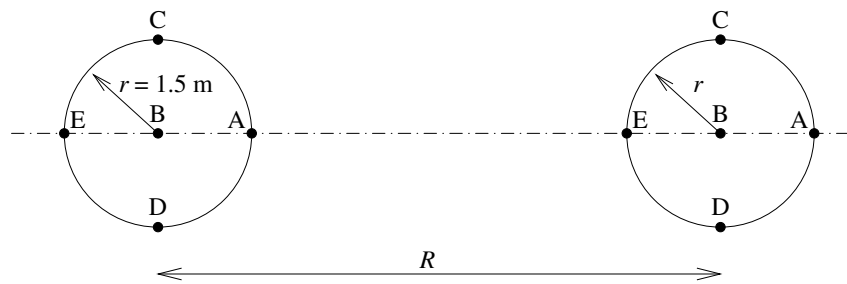


図 3: ACS の検証における測定位置の例

- (c) 測定された NSA は理想的なサイトの $\pm 2 \text{ dB}$ 以内であること。^{†12}
- (d) ACS は §3.6.4 の要求に適合すること。

2. 1~40 GHz:

- (a) 選択された高さの妥当性はサイト減衰量を水平と垂直の双方の偏波で測定して検証する。2 つの測定結果の差は 1 dB 以内でなければならない。
- (b) サイトは ANSI C63.5-2017 J.2.1 の構造上のガイドラインに適合すること。

3.6.4 サイト減衰量の統計基準

1. アンテナを ACS 内の別の場所に動かし、また測定と測定の間でセットアップの分解と再組み立てを行ないながら、それぞれの測定ジオメトリに対して図 3 のアンテナ・ペア位置パターンを用いて少なくとも 5 回のサイト減衰量測定を行なう。
統計的なサンプル・サイズを増やすためにより多くの位置を用いることが推奨される。
この手法はサイトの不完全性と測定セットアップの変動に基づく値の分布を与える。
2. 送信アンテナと受信アンテナの位置はグラウンド・プレーンの縁に沿ったいかなる溶接や継ぎ目とも揃ってははらない。
3. 半径 r は 1.5 m とする。
4. アンテナ・ペアのそれぞれの位置について、水平偏波で高さ 1 m と 2 m、垂直偏波で高さ 1 m と 1.5 m での測定を行なう。

^{†12} アンテナ校正サイトの多くはこれよりもかなり小さい偏差で管理されているものと思われる。[6]

5. それらの位置で得られたサイト減衰量のデータから求めたそれぞれの周波数での標準偏差は以下の範囲にあること:

- 水平偏波: 0.0~0.3 dB
- 垂直偏波: 0.0~0.6 dB

4 標準サイト法 (SSM)

4.1 30~1000 MHz

標準サイト法 (standard site method; SSM) は 30~1000 MHz ではグラウンド・プレーン上での電磁波の伝播に基づくもので、所定の条件を満たすアンテナ校正サイト (§3.6) で

- 水平偏波
- 測定距離 $R = 10$ m
- 送信アンテナ高 $h_1 = 2$ m
- 受信アンテナ高 $1 \text{ m} \leq h_2 \leq 4$ m

の条件で測定されたサイト減衰量 SA からアンテナ係数を算出する。

SA の測定に用いた 2 本のアンテナのアンテナ係数 (dB(1/m)) の合計はその 2 本のアンテナで測定されたサイト減衰量 A から、

$$AF_R + AF_T = A + 20 \log f_M - 48.92 + E_D^{\max}$$

のように求めることができ、その 2 本のアンテナのペアを測定サイトの検証 (NSA の測定) にのみ用いる場合にはこの測定だけで充分かも知れない。^{†13}

だが、この結果だけからでは、そのアンテナを通常の測定で使用する際に必要となるそれぞれのアンテナのアンテナ係数を知ることはできない。

そこで、標準サイト法では、通常は校正対象のアンテナを含む 3 本のアンテナ (3 本全てが校正対象であっても良い) を用いて図 4 のようにアンテナの組み合わせを変えてそれぞれについての SA ($A_1 \sim A_3$) を測定し、その結果から

$$AF_1 = 10 \log f_M - 24.46 + (E_D^{\max} + A_1 + A_2 - A_3)/2$$

$$AF_2 = 10 \log f_M - 24.46 + (E_D^{\max} + A_1 - A_2 + A_3)/2$$

$$AF_3 = 10 \log f_M - 24.46 + (E_D^{\max} - A_1 + A_2 + A_3)/2$$

のようにしてそれぞれのアンテナのアンテナ係数 $AF_1 \sim AF_3$ を算出する。

この測定は、規定された離散的な周波数ポイント (30, 35, 40, ..., 900, 1000 MHz) で、あるいは 30~200 MHz は 1 MHz 以下、200~1000 MHz は 5 MHz 以下の周波数ステップでの周波数掃引によって行なうことができる。

^{†13} NSA 測定に用いるアンテナはアンテナ係数の測定を標準サイト法を用いてペアで行なう (ANSI C63.5-2017 §4.4.2)。

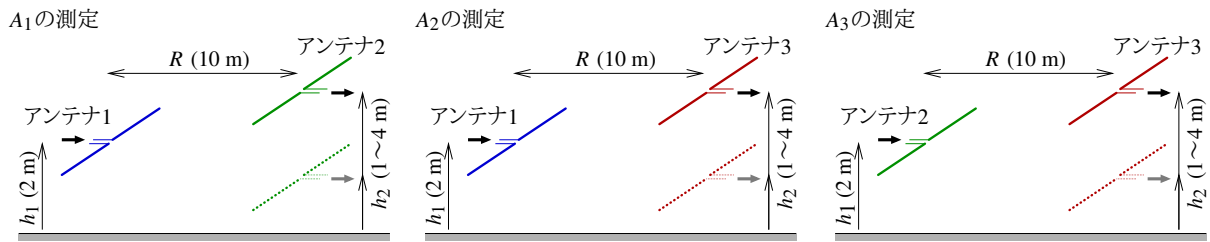


図 4: 標準サイト法 — SA の測定 (30~1000 MHz)

4.1.1 E_D^{\max}

グラウンド・プレーン上に送信アンテナと受信アンテナを置いた場合、図5に示すように、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グラウンド・プレーンで反射した反射波（これはグラウンド・プレーンによって生じた送信アンテナの鏡像からの放射と見ることもできる）も到達することになる。

反射波は直接波と異なる経路を伝播するため、直接波とのあいだに位相差を生じ、その位相差に応じて強め合ったり打ち消し合ったりするが、無限に広がる均一なグラウンド・プレーンを持つ理想的なサイト上での電磁波の伝播は簡単な式で求めることができる。

無限に広がる均一なグラウンド・プレーンを持つ理想的なサイトに置かれた水平偏波のダイポール・アンテナが 1 pW を放射している時の受信アンテナの位置における最大の電界強度 E_{DH}^{\max} (dB μ V/m) は

$$E_{DH}^{\max} = \sqrt{49.2} \frac{\sqrt{d_2^2 + d_1^2 |\rho_h|^2 + 2d_1 d_2 |\rho_h| \cos(\phi_h - \beta[d_2 - d_1])}}{d_1 d_2} \Big|_{h_2^{\min} \leq h_2 \leq h_2^{\max}} \text{での最大値}$$

但し、

- d_1 (m) は直接波の経路長で、 $d_1 = \sqrt{R^2 + (h_1 - h_2)^2}$
- d_2 (m) は反射波の経路長で、 $d_2 = \sqrt{R^2 + (h_1 + h_2)^2}$
- R (m) は送信アンテナと受信アンテナの水平距離
- h_1 (m) は送信アンテナの高さ
- h_2 (m) は受信アンテナの高さで、 $h_2^{\min} \leq h_2 \leq h_2^{\max}$
- ρ_h は大地面の反射係数で、導電率 $\sigma \rightarrow \infty$ で、 $\rho_h = \frac{\sin \gamma - \sqrt{K - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma}}{\sin \gamma + \sqrt{K - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma}} \simeq -1$
- ϕ_h は大地面の反射係数の位相角で $\rho_h = |\rho_h| e^{j\phi_h}$
- K は大地面の比誘電率
- β は波数で、 $\beta = 2\pi/\lambda$

また、垂直偏波の場合は、同様に

$$E_{DV}^{\max} = \sqrt{49.2} \frac{R^2 \sqrt{d_2^6 + d_1^6 |\rho_v|^2 + 2d_1^3 d_2^3 |\rho_v| \cos(\phi_v - \beta[d_2 - d_1])}}{d_1^3 d_2^3} \Big|_{h_2^{\min} \leq h_2 \leq h_2^{\max}} \text{での最大値}$$

但し、

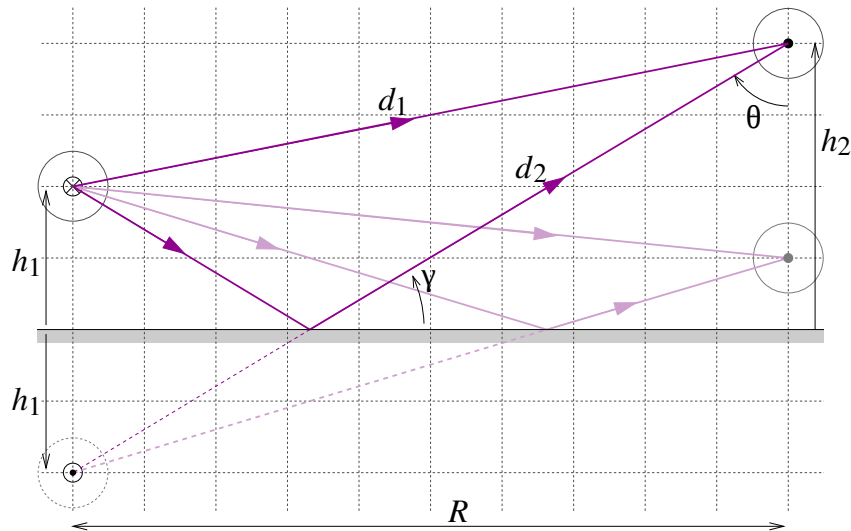


図 5: グランド・プレーン上での電磁波の伝播 (水平偏波)

- ρ_v は大地面の反射係数で、導電率 $\sigma \rightarrow \infty$ で、 $\rho_v = \frac{(K - j60\lambda\sigma) \sin \gamma - \sqrt{K - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma}}{(K - j60\lambda\sigma) \sin \gamma + \sqrt{K - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma}} \approx 1$
- ϕ_v は大地面の反射係数の位相角で $\rho_v = |\rho_v|e^{j\phi_v}$
- d_1 、 d_2 、 β 、 K は水平偏波の場合と同様

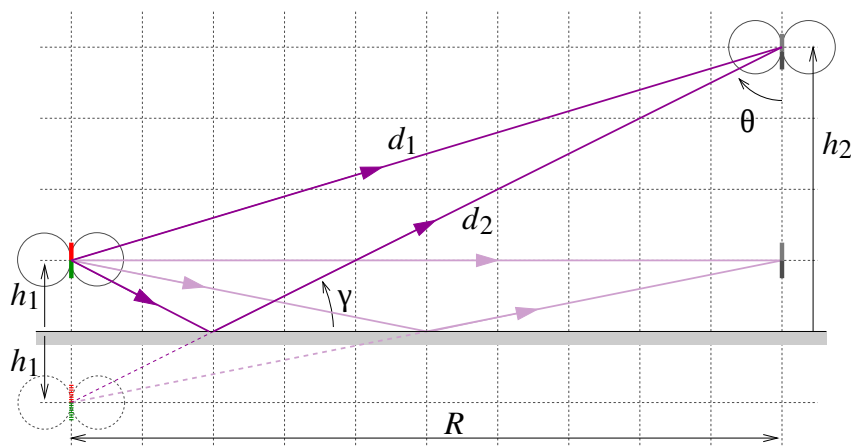


図 6: グランド・プレーン上での電磁波の伝播 (垂直偏波)

4.2 1~40 GHz

1~40 GHz の周波数範囲の校正は自由空間条件^{†14}での標準サイト法 (SSM) で、1.5 m 以上の固定のアンテナ高さで、周波数掃引法によって行なう:

1. アンテナ校正は以下の構成で行なう:

(a) 校正距離 R は、 D をアンテナの開口の最大寸法 (幅か高さ)、 λ を波長として、

^{†14} 通常、自由空間条件は、グランド・プレーン上に電波吸収体を敷設することで、及び/もしくはアンテナ高さを大きくする (反射波の経路長が (従って減衰が) 大きくなるため、そしておそらくはアンテナの指向性の寄与のため、反射波の影響が低減される) ことで達成できる。

- i. $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ (リアクティブ近傍界領域) では校正は行なわない。
- ii. $0.62\sqrt{D^3/\lambda} \leq R < 2D^2/\lambda$ (フレネル領域) で測定されたアンテナ係数はその距離で使用できる。
- iii. $R \geq 2D^2/\lambda$ (フラウンホーファー領域、遠方界) で測定されたアンテナ係数はその距離以上で使用できる。^{†15}

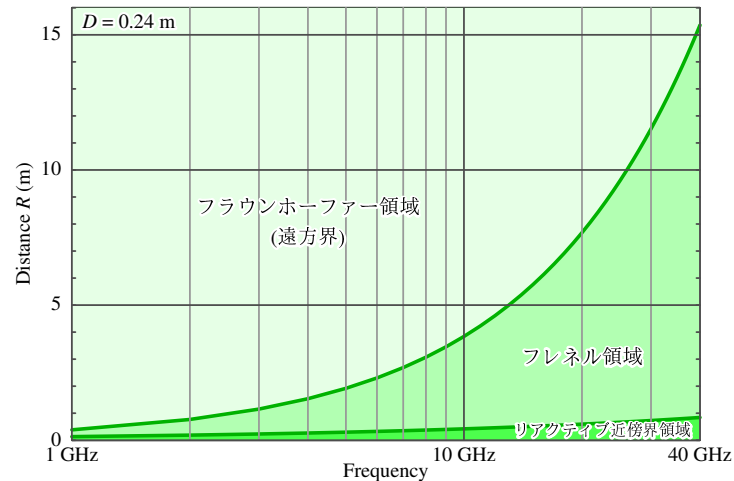


図 7: リアクティブ近傍界領域、フレネル領域、フラウンホーファー領域 ($D = 0.24$ m の場合)

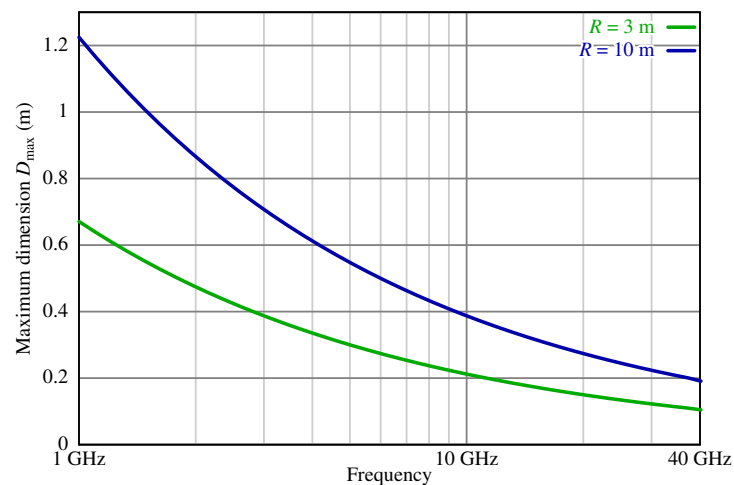


図 8: 遠方界条件 (フラウンホーファー領域) を満たすアンテナの最大開口寸法 D

(b) E_D^{\max} は

$$E_D^{\max} = 10 \log 49.2 - 20 \log R = 16.9 - 20 \log R \quad (\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m}))$$

によって計算でき、 $R = 3$ m の場合は $E_D^{\max} = 7.36$ dB($\mu\text{V}/\text{m}$) となる。

(c) 送信アンテナ高さは 1.5 m 以上、受信アンテナ高さは送信アンテナ高さと同じとする。

(d) アンテナ係数は、上記の E_D^{\max} 、及び測定されたサイト減衰量から、§4.3のように算出する。

^{†15} ANSI C63.4-2014^[2] では測定距離は $2D^2/\lambda$ 以上であることが求められている。

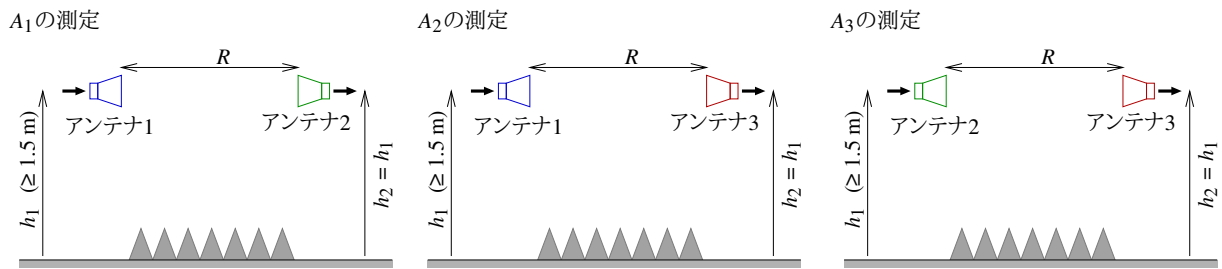


図 9: 標準サイト法 — SA の測定 (1~40 GHz)

2. 自由空間試験要求:

- (a) 選択された高さにおける自由空間試験環境の妥当性は水平偏波と垂直偏波の双方でのサイト減衰量の測定によって検証する。
2つの測定結果の差は 1 dB 以内であること。
- (b) その要求が満たされない場合、要求が満たされるまで、双方のアンテナの高さを上げるか、アンテナ間のグラウンド・プレーン上に電波吸収体を追加する。
- (c) その要求に適合させて自由空間アンテナ係数を得るために ANSI C63.5-2017 §5.1.3.2 で触れられているようにタイム・ゲーティング^{†16}を用いることもできる。

4.2.1 E_D^{\max}

自由空間中で電力 P を放射している等方性の放射源から距離 R においては、電力密度 $P_D = P/4\pi R^2$ 、従って電界強度 $E = \sqrt{30P}/R$ となる。

半波長ダイポール・アンテナは約 1.64 のゲインを持つので、自由空間中で電力 $P = 1$ pW を放射している半波長ダイポール・アンテナから距離 R における最大電界強度 E_D^{\max} (dB(μ V/m)) は、

$$E_D^{\max} = 20 \log(\sqrt{30P} \times 1.64/R) = 10 \log 49.2 - 20 \log R$$

となる。

4.3 補足説明 — アンテナ係数の算出

理想的なサイトのサイト減衰量 A は、 f_M (MHz) を周波数、 E_D^{\max} (μ V/m) を受信アンテナの位置における最大電界強度、 AF_R (1/m) と AF_T (1/m) を受信アンテナと送信アンテナのアンテナ係数として、

$$A = \frac{279.1AF_R AF_T}{f_M E_D^{\max}}$$

より、あるいは A 、 AF_R 、 AF_T 、 E_D^{\max} をデシベルで表現して

$$A = -20 \log f_M + 48.92 + AF_R + AF_T - E_D^{\max}$$

より求めることができる^[3]。

従って、理想的なサイトとみなせるようなサイトでサイト減衰量を測定すれば、その結果から

$$AF_R + AF_T = A + 20 \log f_M - 48.92 + E_D^{\max}$$

^{†16} ここでは詳細は述べないが、直接波と反射波では受信アンテナへの到達に時間差が生じることを利用して反射波の影響を排除する。

として送受信アンテナのアンテナ係数の合計 $AF_R + AF_T$ を求めることができる。

これだけではそれぞれのアンテナのアンテナ係数を知ることはできないが、それぞれのアンテナ係数が $AF_1 \sim AF_3$ である 3 本のアンテナを図 4 のように組み合わせを変えて測定して 3 組のサイト減衰量 $A_1 \sim A_3$ を得ることで、

$$AF_1 + AF_2 = A_1 + 20 \log f_M - 48.92 + E_D^{\max}$$

$$AF_1 + AF_3 = A_2 + 20 \log f_M - 48.92 + E_D^{\max}$$

$$AF_2 + AF_3 = A_3 + 20 \log f_M - 48.92 + E_D^{\max}$$

より、

$$AF_1 = 10 \log f_M - 24.46 + (E_D^{\max} + A_1 + A_2 - A_3)/2$$

$$AF_2 = 10 \log f_M - 24.46 + (E_D^{\max} + A_1 - A_2 + A_3)/2$$

$$AF_3 = 10 \log f_M - 24.46 + (E_D^{\max} - A_1 + A_2 + A_3)/2$$

のようにそれぞれのアンテナのアンテナ係数 $AF_1 \sim AF_3$ を求めることができる。

5 参照アンテナ法 (RAM)

参照アンテナ法 (reference antenna method; RAM) では、Roberts ダイポール^{†17}かその他の計算可能ダイポール^{†18}を参照アンテナとして用い、それとの比較によって校正対象アンテナのアンテナ係数を同定する。

30~1000 MHz の周波数範囲をカバーするが、ANSI C63.5-2017 ではバイコニカル・アンテナに対してのみ適用可能となっている (表 1)。

1. 送信アンテナ (その周波数に対応した任意のダイポール・アンテナやバイコニカル・アンテナ) をグラウンド・プレーンからの高さ (h_1) 2.5~4 m の範囲の任意の高さに配置する。
500 MHz 程度以上ではより低い高さ (例えば $h_1 = 0.75$ m) としても良い。^{†19}
2. 参照アンテナを送信アンテナから水平距離で 10 m に配置し、グラウンド・プレーンからの高さ (h_2) 2.5~4 m の範囲で信号強度の高さによる変化が緩やかになる高さを探す。^{†20}
3. 参照アンテナで観測された信号強度 V_R を記録する。
4. 参照アンテナを校正対象のアンテナに変え、参照アンテナでの測定を行なったのと正確に同じ位置に校正対象アンテナを置く。
5. 校正対象アンテナで観測された信号強度 V_{AUC} を記録する。

^{†17} ANSI C63.5-2017 Annex C と Annex D で示された、直並列同軸スタブ・バランを用いた同調半波長共振ダイポール。

^{†18} ANSI C63.5-2017 でその他の計算可能ダイポールを参照アンテナとして使用できる旨の記載が加わり、Roberts ダイポール以外の半波長ダイポールを参照アンテナとして使用できるようになった。

^{†19} 図 11 で例示するように、高い周波数での h_2 に対する信号レベルの変化が h_1 を低くした方が緩やかになる。

^{†20} 図 11 で例示するように、直接波と反射波の干渉に伴い、高い周波数では信号レベルが h_2 によって激しく変動する。特にヌル (直接波と反射波が相殺され、信号レベルが顕著に低くなるポイント) の近傍では信号レベルが低くなるとともに h_2 に対する信号レベルの変化が大きくなるため、その付近での測定は避ける必要がある。2.5 ≤ h_e ≤ 4 m の範囲で信号レベルが最大になる位置を探す必要はないが、高い周波数では 1 つ以上のピークが現れ、ピーク付近では h_2 に対する信号レベルの変化が小さくなる (図 11) 管があるので、そのような周波数ではいずれかのピーク付近の高さを選択するのが良いと思われる。

6. 校正対象アンテナのアンテナ係数 AF_{AUC} (dB(1/m)) は、計算によって求められた参照アンテナのアンテナ係数 AF_R (dB(1/m))、及び測定された V_R と V_{AUC} (dB(μ V)) から、

$$AF_{AUC} = AF_R + V_R - V_{AUC}$$

のように求められる。

ANSI C63.5-2017 Annex C~D で示されている Roberts ダイポールについては、周波数 f_M (MHz) におけるアンテナ係数 AF_R (dB(1/m)) は、

$$AF_R = 20 \log f_M - 31.4$$

より求められると述べられており、一連の周波数に対するエレメント長とアンテナ係数が ANSI C63.5-2017 Table 5 で示されている。

Roberts ダイポールやその他の同調ダイポールは測定周波数毎にエレメントの長さを調整することが必要であり、従ってこの測定は離散的な周波数 (典型的には ANSI C63.5-2017 Table 5 で示されている 30, 35, 40, ..., 900, 1000 MHz といった周波数ポイント) で行なわれる。

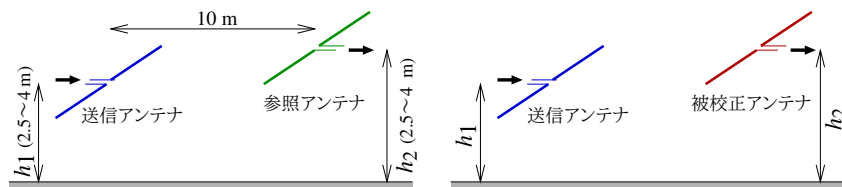


図 10: 参照アンテナ法 — SA の測定

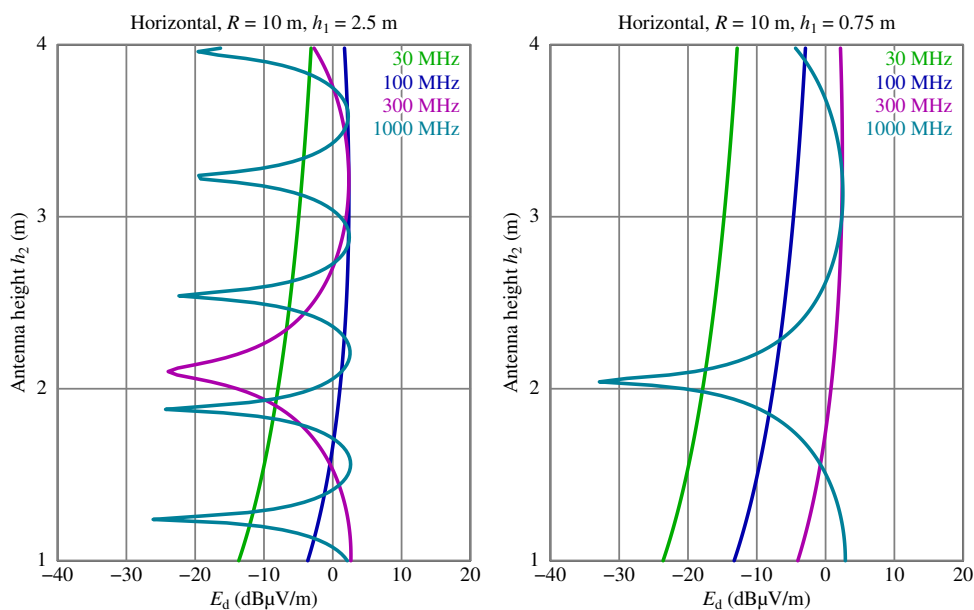


図 11: ハイト・パターンの例

6 等価容量置換法 (ECSM)

等価容量置換法 (equivalent capacitance substitution method; ECSM) は 1.04 m モノポール・アンテナの 9 kHz~30 MHz の周波数範囲での校正に用いられるものである。

このモノポール・アンテナのエレメントは電氣的に短く (30 MHz でも約 $\lambda/10$)、容量性となるとみなせるため、アンテナ結合ユニット (通常は高入力インピーダンスのヘッドアンプ) にエレメントの代わりにエレメントを代表するコンデンサを接続して行なった測定の結果からアンテナ係数を算出する方法が用いられる。

1. ロッド入力ポートにダミー・アンテナを介して適切なレベルの信号を印加し、アンテナ結合ユニットからの出力電圧 V_L を測定する (図 12 (a))。

ダミー・アンテナの入力側の T コネクタのもう 1 つのポートには 50 Ω 終端器を接続する。

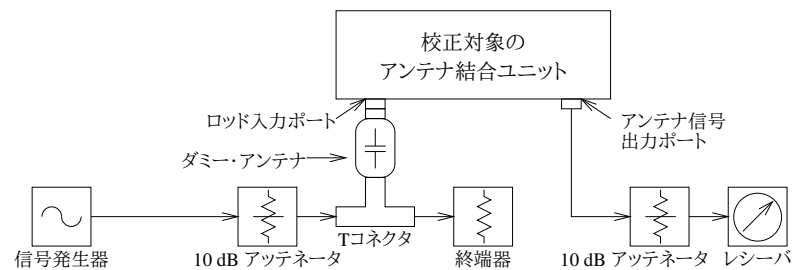
2. 信号レベルを同一に維持したまま、ダミー・アンテナの入力側の T コネクタにレシーバなどを接続し、ダミー・アンテナの入力側に印加された電圧 V_D を測定する (図 12 (b))。

3. アンテナ係数 AF (dB(1/m)) は、

$$AF = V_D - V_L + 6.02$$

より算出できる。^{†21}

(a) V_L (結合ユニットの出力) の測定



(b) V_D (信号発生器の出力) の測定

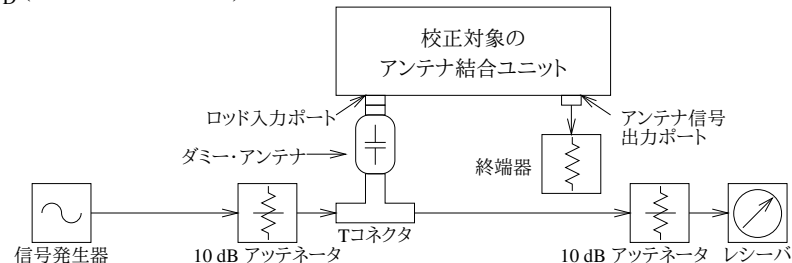


図 12: 等価容量置換法

6.1 ダミー・アンテナ

h (m) をモノポール・エレメントの長さ、 a (m) をモノポール・エレメントの平均半径、 λ (m) を波長として、モノポール・エレメントの等価容量 C_a (pF) は、

$$C_a = \frac{55.6h}{\ln(h/a) - 1} \frac{\tan(2\pi h/\lambda)}{2\pi h/\lambda}$$

から求められ、これがダミー・アンテナで使用すべき静電容量となる (図 13)。

^{†21} エレメント長は 1.04 m で、実効高は $h_e = 0.52$ m、実効高に対する補正係数は $20 \log h_e = 5.70$ となる筈 (図 14) だが、ANSI C63.5-2017 §7.1 NOTE 1 で実効高は 0.5 m と、また式 (10) では補正係数として 6.02 を用いるように述べられている。

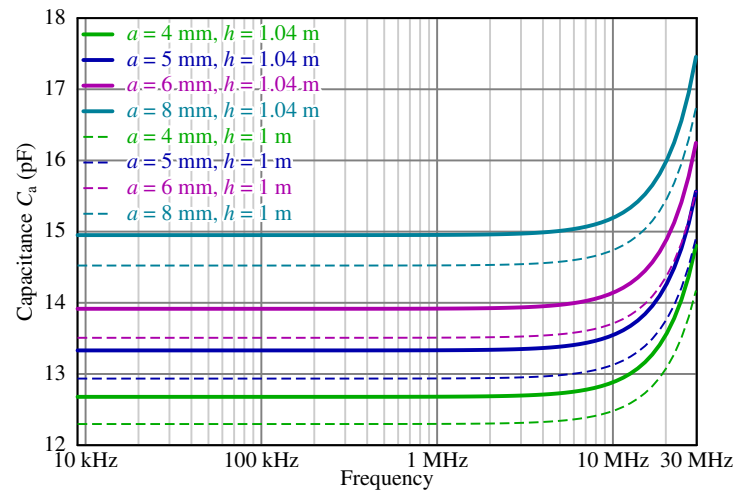


図 13: ECSM — モノポール・エレメントの等価容量 C_a

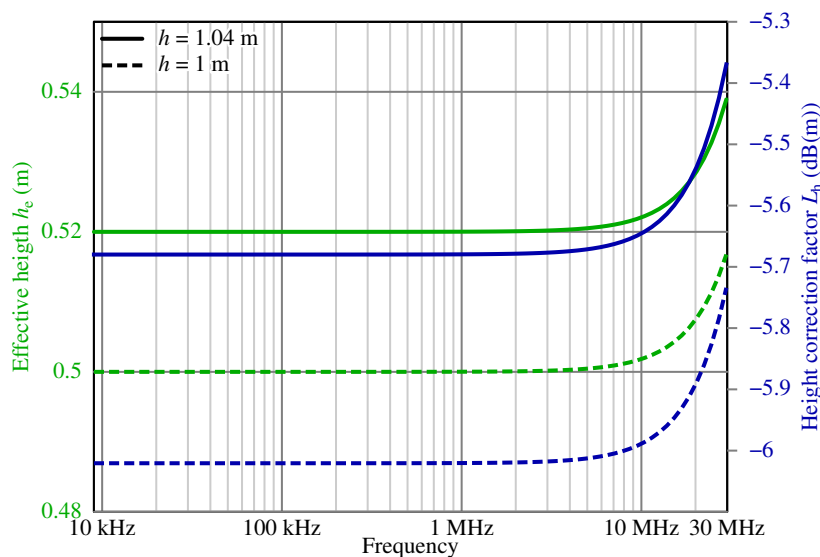


図 14: ECSM — モノポール・アンテナの実効高 h_e と補正係数

7 参考資料

- [1] 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)*
- [2] 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*
- [3] *Calculation of Site Attenuation From Antenna Factors*, Albert A. Smith et al., IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1982, DOI: [10.1109/TEMC.1982.304041](https://doi.org/10.1109/TEMC.1982.304041)
- [4] *Standard-Site Method for Determining Antenna Factors*, Albert A. Smith, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1982, DOI: [10.1109/TEMC.1982.304042](https://doi.org/10.1109/TEMC.1982.304042)
- [5] CISPR 16-1-6, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods — Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus — EMC antenna calibration*

- [6] *Design, Construction and Validation of a High-Performance OATS*, Donglin Meng, 2021, DOI: [10.5772/intechopen.99727](https://doi.org/10.5772/intechopen.99727)
- [7] *Measurement Good Practice Guide No. 73: Calibration and use of antennas, focusing on EMC applications*, M J Alexander et al., 2004, National Physical Laboratory, UK, <https://www.npl.co.uk/resources/gpgs>

© 2024 e-OHTAMA, LTD. All rights reserved.

免責条項 — 当社ならびに著者は、この文書の情報に関して細心の注意を払っておりますが、その正確性、有用性、完全性、その利用に起因する損害等に関し、一切の責任を負いません。