

測定距離 10 m と 3 m でのエミッション測定の相関

T. Sato

平成 27 年 5 月 6 日

一般に、測定距離 10 m と 3 m ではエミッション・レベルが 10 dB 程度変化すると仮定され、しばしば、この仮定に基づいて、測定距離 10 m と 3 m で 10 dB 異なる限度値が設定され、あるいは $1/d$ (-20 dB/decade) での距離換算が認められている。しかしながら、距離 10 m と 3 m での測定結果の相関はそれほど良くないことが知られており、測定距離 3 m での予備測定で大丈夫だろうと判断されたものが測定距離 10 m での本測定で不合格となることも珍しくない。本稿では、そのような良くない相関の原因の 1 つについての検討を行なう。

1 単純な推定

1.1 自由空間での電磁波の減衰

遠方界においては、自由空間を伝搬する電磁波の電力密度は距離の二乗に反比例して減衰し、従ってその電界強度は距離に反比例して ($1/d$ 、また -20 dB/decade で) 減衰する。¹

1.2 大地面上での電磁波の伝播

大地面上に送信アンテナと受信アンテナを置いた場合、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。他の条件を一定としたままで受信アンテナの高さを変えた時、伝播距離の差も変化し、ハイトパターンと呼ばれる変動パターンを生じるが、入射波と反射波の位相が一致した時、最大で、直接波のみの場合の $+6$ dB (大地面での吸収や散乱、伝播距離の違いによる減衰量の違い、アンテナの指向性などの影響を無視して) の電界強度が生じると考えられる。

大地面の反射がある場合でも、アンテナ間距離がアンテナ高に対して十分に大きく、また受信アンテナを十分に大きい範囲で昇降させて最大値を見付ける場合には、自由空間中の伝播と同様、電界強度は距離に反比例すると仮定できそうである。

しかしながら、エミッション測定に際してはアンテナ間距離が十分に大きいとは言えず、また受信アンテナの昇降の範囲も制限されているため、その影響の考慮が必要となる。

¹単純に電磁波が球状に拡がる場合を考えればわかるであろうように、電磁波が空間に拡がる時、電磁波が横切らなければならない表面積 (球の表面積) は距離の二乗に比例して増大し、従ってその面を横切る時の電力密度は距離の二乗に反比例して減衰することになる。電力密度は電界強度の二乗に比例する ($P_d = E^2/Z$) ので、電力密度が距離の二乗に反比例して減衰するということは、電界強度は距離に反比例して減衰するということである。

2 理論的考察

2.1 計算式

2.1.1 水平偏波

ダイポール・アンテナは、H 面内では顕著な指向性を持たないため、水平偏波の場合、その影響の考慮は不要と考えられる。しかしながら、経路長はアンテナ高に応じて変化するので、その考慮は必要となる。

[1] によると、水平偏波、送信アンテナ高 h_1 、受信アンテナ高 h_2 の条件での、受信アンテナでの受信レベルは、

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

但し、

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

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

R はアンテナ間の水平面上での距離、

ρ_h は大地面の反射係数で、 $\sigma \rightarrow \infty$ の場合、 $\rho_h = \frac{\sin \gamma - \sqrt{K - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma}}{\sin \gamma + \sqrt{K - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma}} \simeq -1$

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

γ は大地面への入射角

K は大地面の比誘電率

σ は大地面の導電率 (S/m) で、金属面の場合は $\sigma \rightarrow \infty$ と仮定できる

β は波数で、 $\beta = 2\pi/\lambda$

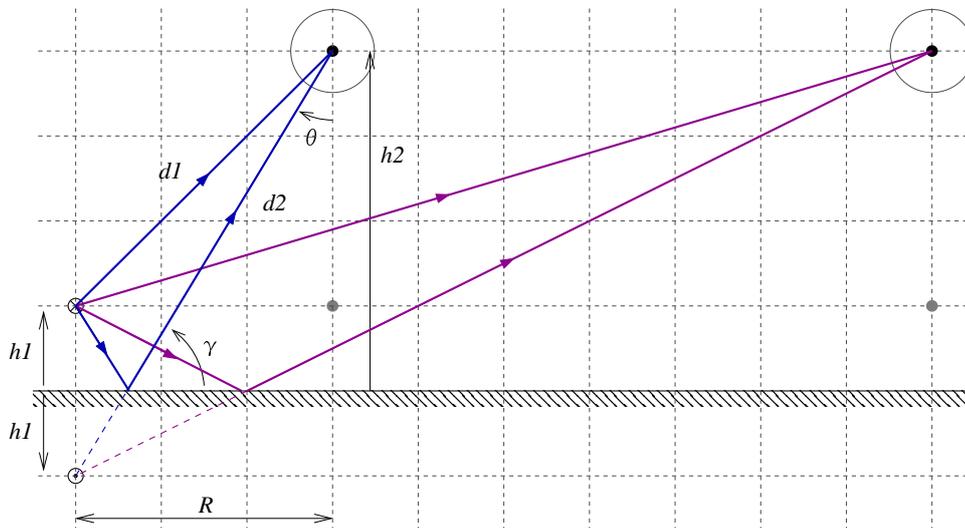


図 1: 直接波と反射波 (水平偏波)

2.1.2 垂直偏波

ダイポール・アンテナも、E 面内では顕著な指向性を持つため、垂直偏波の場合、その影響の考慮も必要となる。ダイポール・アンテナの指向性は、 $F(\theta) \simeq \sin \theta = R/d$ で近似できると仮定できる。

[1] によると、垂直偏波、送信アンテナ高 h_1 、受信アンテナ高 h_2 の条件での、受信アンテナでの受信レベルは、

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

但し、

$$\rho_v \text{ は大地面の反射係数で、} \sigma \rightarrow \infty \text{ の場合、} \rho_v = \frac{(K - j60\lambda\sigma) \sin \gamma - \sqrt{K - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma}}{(K - j60\lambda\sigma) \sin \gamma + \sqrt{K - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma}} \simeq 1$$

$$\phi_v \text{ は大地面の反射係数の位相角で、} \rho_v = |\rho_v| e^{j\phi_v}$$

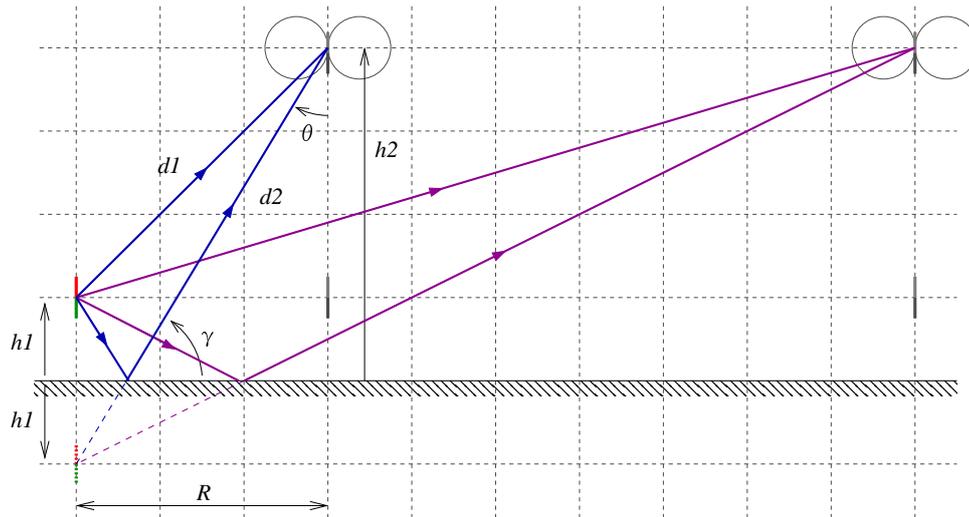


図 2: 直接波と反射波 (垂直偏波)

2.2 ハイトパターン

測定距離 R を 10 m と 3 m とした時のハイトパターンの例を先の式を用いて求めた結果を図 3 に示す。

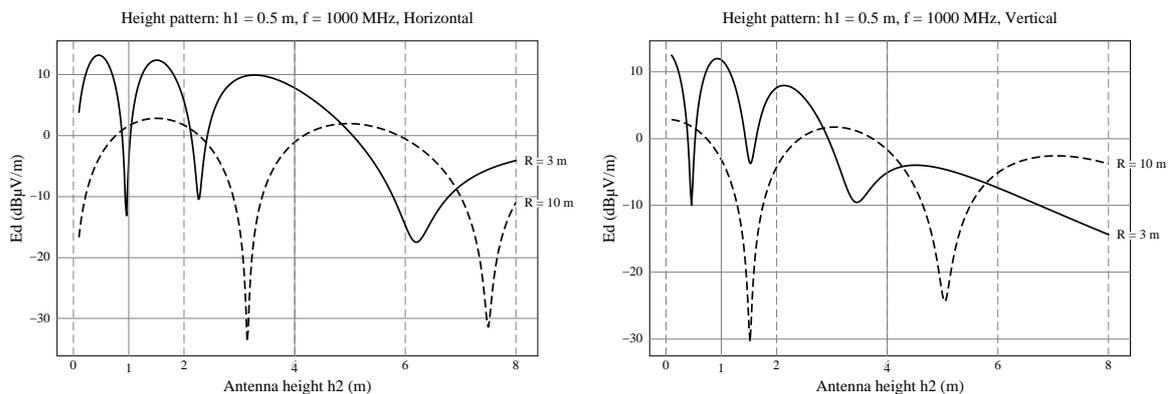


図 3: ハイトパターン: $h_1 = 0.5$ m、 $f = 1000$ MHz、水平偏波 (左) と垂直偏波 (右)

ここで、水平偏波と垂直偏波で概ね山と谷が逆となっていること、また特に $R = 3$ m の場合について垂直偏波の方が h_2 を上げた時のレベルの低下が大きいことが目につくだろう。

後者の現象には、図 2 (寸法の比率は正しい) に示すように、 h_2 が大きい時、経路長が長くなるとともに、入射角 θ が著しく小さくなってアンテナの指向性の影響で感度が有意に低下することが影響している。 $R = 10 \text{ m}$ の場合、 $h_2 = 4 \text{ m}$ でも θ はそれほど小さくならず、また経路長の変化の割合も小さくなるため、その影響は比較的小さいものとなる。

前者の現象は、送信アンテナのイメージ (図 1 と図 2 で大地面の下に示した、送信アンテナの鏡像) の方向の影響である。

2.3 正規化サイト・アッテネーション

正規化サイト・アッテネーション (NSA) は、実際のエミッション測定の場合と同様、受信アンテナ高 h_2 を所定の範囲内で変化させた時の最大の受信レベルから求められ、従ってエミッション測定での測定結果の差の指標となると考えられる。

送信アンテナ高 $h_1 = 0.5 \text{ m}$ (机から垂れ下がるケーブルが主な放射源となるような状況を想定)、受信アンテナ高 $1 \text{ m} \leq h_2 \leq 4 \text{ m}$ の条件で NSA を計算した結果を図 4 に、またいくつかの h_1 について測定距離 $R = 10 \text{ m}$ と 3 m での NSA の差を計算した結果を図 5 に示す。

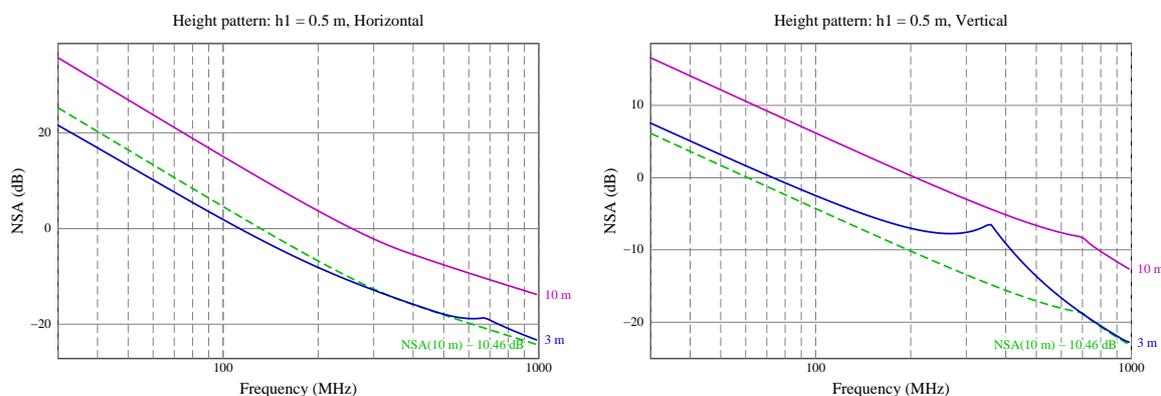


図 4: 正規化サイト・アッテネーション: $h_1 = 0.5 \text{ m}$ 、 $1 \text{ m} \leq h_2 \leq 4 \text{ m}$ 、水平偏波 (左) と垂直偏波 (右)

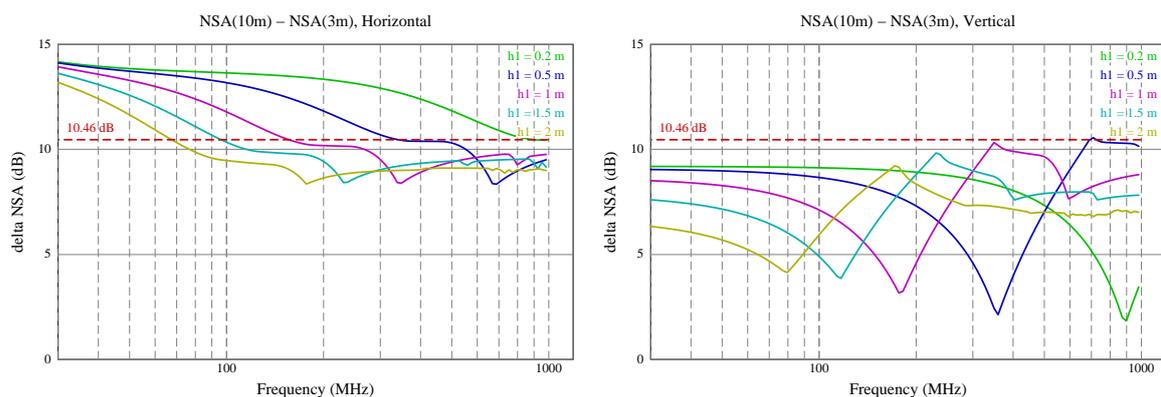


図 5: $R = 10 \text{ m}$ と 3 m での正規化サイト・アッテネーションの差: 水平偏波 (左) と垂直偏波 (右)

ここで、垂直偏波について、測定距離 10 m と 3 m の時の NSA の差が全般的に単純な $1/d$ から推定される 10.46 dB ($= 20 \log(10/3)$) よりも小さくなっていること、特に $h_1 = 0.5 \text{ m}$ の場合に 350 MHz 近傍でその差が 2 dB 程度となっていることに注意されたい。

これは、測定距離を 10 m から 3 m に変えた時のエミッション・レベルの増加が 10 dB よりもかなり小さい可能性があることを、従って測定距離 10 m と 3 m でノイズ・レベルが 10 dB 変化するという仮定に基づいた 3 m での測定が有意に甘いものとなる可能性があることを意味する。

垂直偏波、 $h_1 = 0.5$ m、 $f = 350$ MHz でのハイト・パターンは図 6 のようになり、これを見ると、 $R = 3$ m の時、 $1 \text{ m} \leq h_2 \leq 4 \text{ m}$ の範囲外 ($h_2 \simeq 0$ m) では $R = 10$ m の時よりも 10 dB 程度高いレベルに達しているところもあるものの、 $1 \text{ m} \leq h_2 \leq 4 \text{ m}$ の範囲内では、 $h_2 \simeq 1$ m ではレベルはかなり低下しており、それよりも上では、 $h_2 \simeq 2.5$ m あたりで、 $R = 10$ m の時の $1 \text{ m} \leq h_2 \leq 4 \text{ m}$ での最大レベルよりも 2 dB 程度高いレベルに達するだけとなっている。

$R = 3$ m、 $h_1 = 0.5$ m、 $f = 350$ MHz で直接波と反射波が同相となるのは h_2 が 4 m を超えるところであるが、 $h_2 = 4$ m では、 $d_2 \simeq 5.4$ m、 $F(\theta) \simeq R/d \simeq 0.56$ となるので、そのような高い位置では、アンテナの指向性と経路長の影響のため、レベルは有意に低くなっている。

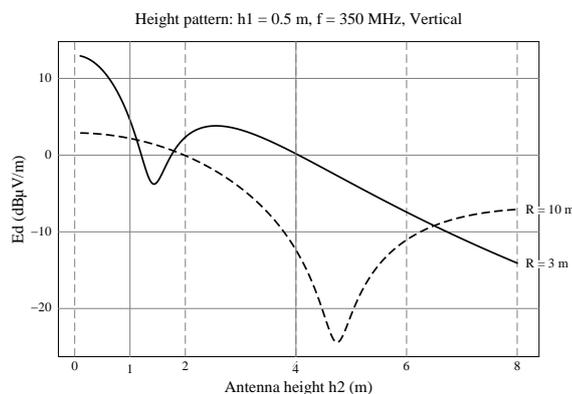


図 6: ハイトパターン: $h_1 = 0.5$ m、 $f = 350$ MHz、垂直偏波

3 その他の要因の例

1. 近傍界においては、電界や磁界の強度は、 $1/d$ よりも急速に減衰することがある。

150 kHz では $\lambda/(2\pi) \simeq 300$ m、9 kHz では $\lambda/(2\pi) \simeq 5$ km となるので、そのような低い周波数においては、一般に、 $1/d$ (-20 dB/decade) による推定はほとんど当てにならない。

30 MHz では $\lambda/(2\pi) \simeq 1.6$ m となるので、通常、30 MHz 以上の周波数では 3 m は遠方界とみなすことができる。

2. 一般に、放射エミッション測定の不確かさは ± 4 dB を超え、測定を同じ測定距離で行なった場合でさえも、別のサイトとの高い相関を期待することは危険である。

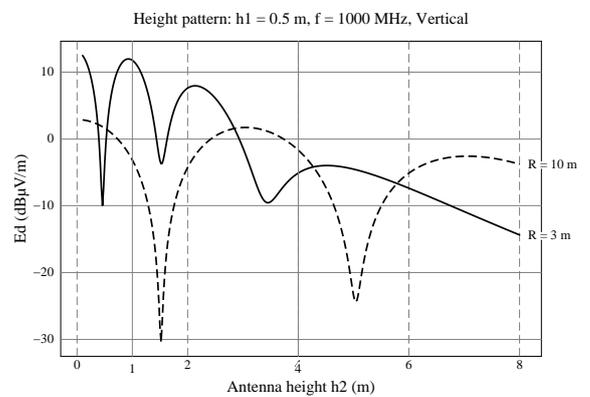
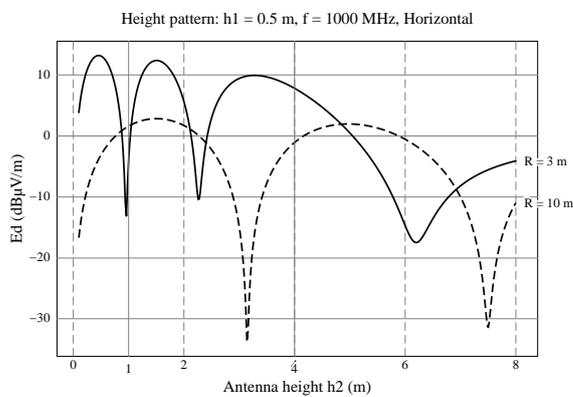
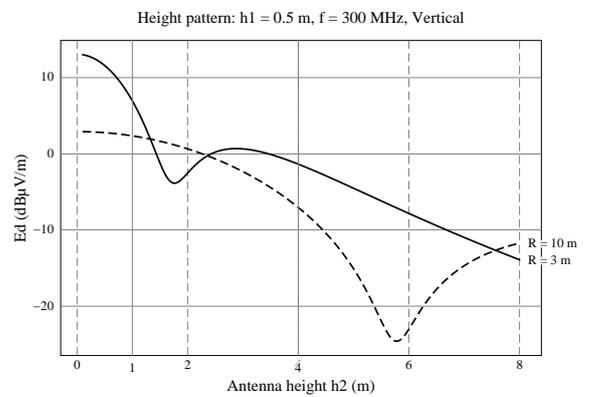
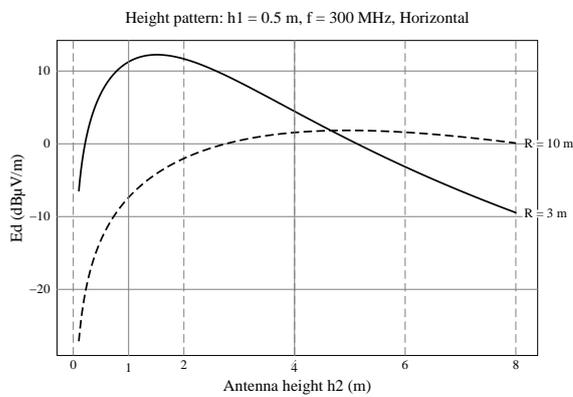
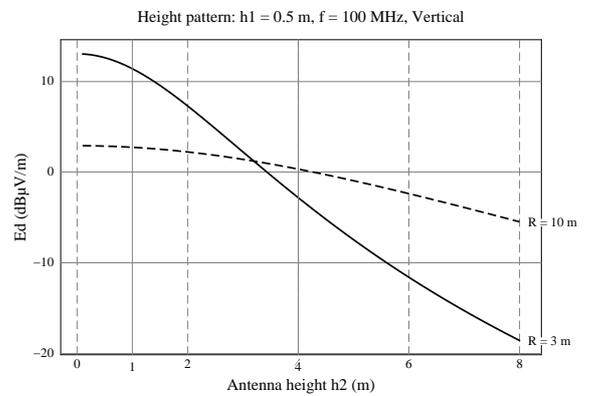
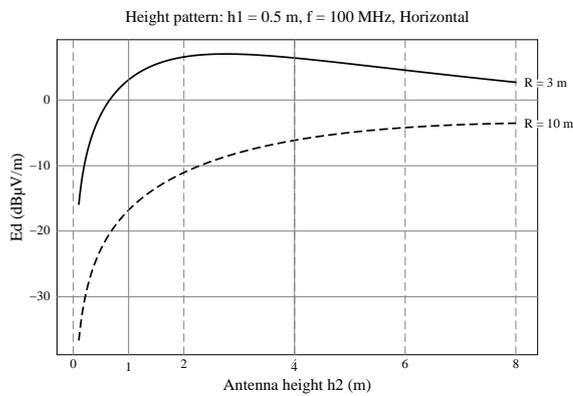
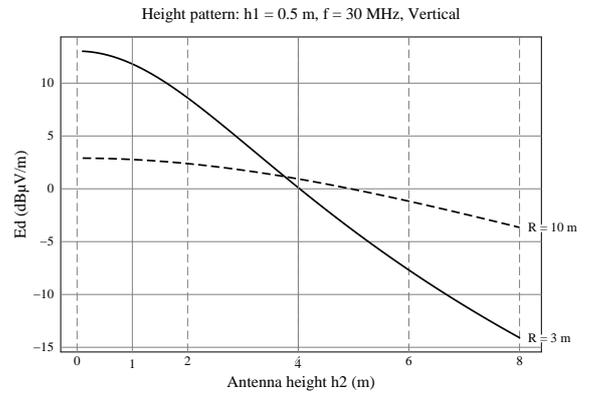
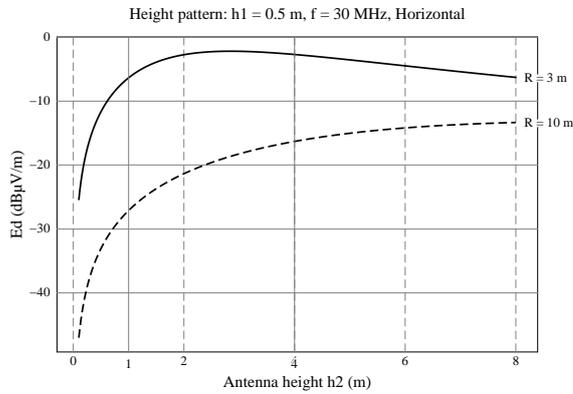
4 参考資料

[1] *Calculation of Site Attenuation from Antenna Factors*, Albert A. Smith, Jr et al., IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (Volume: EMC-24, Issue: 3), IEEE, 1982, DOI: 10.1109/TEMPC.1982.304041

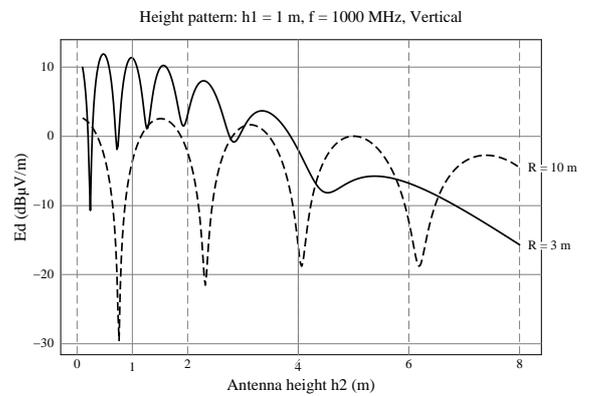
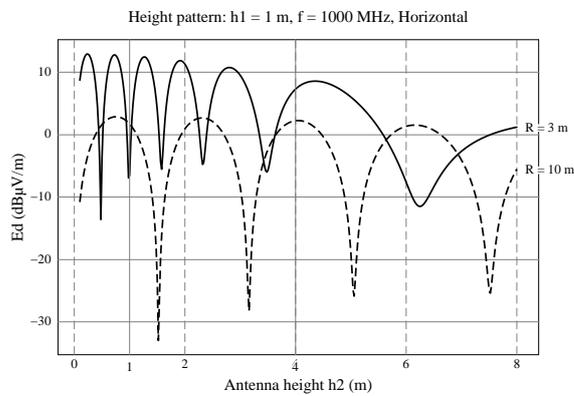
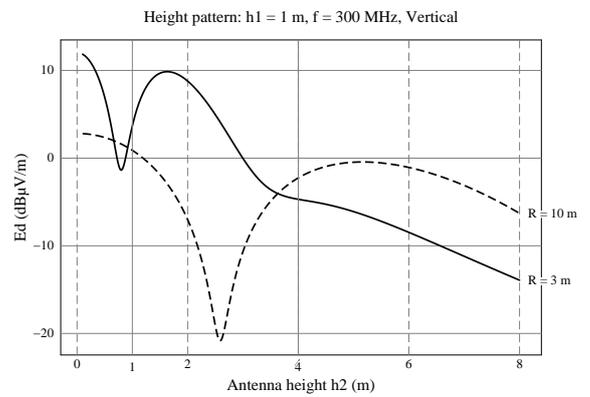
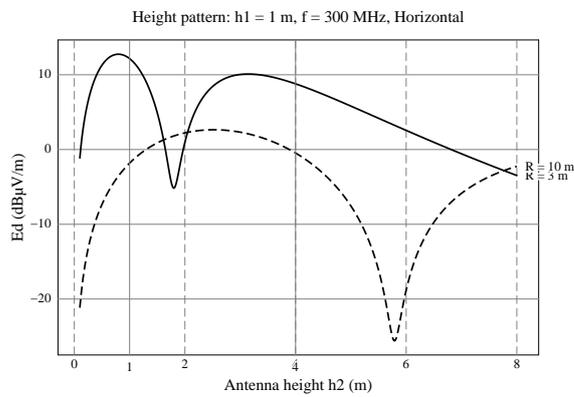
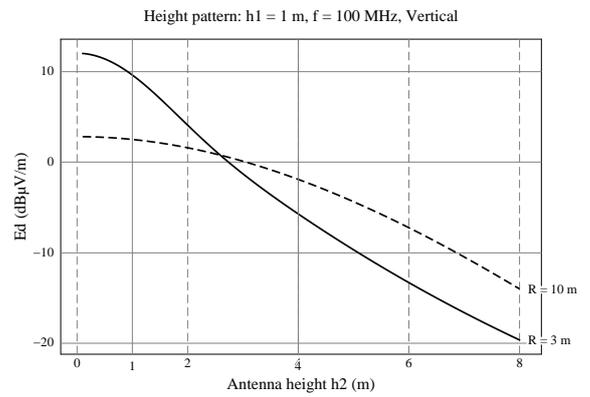
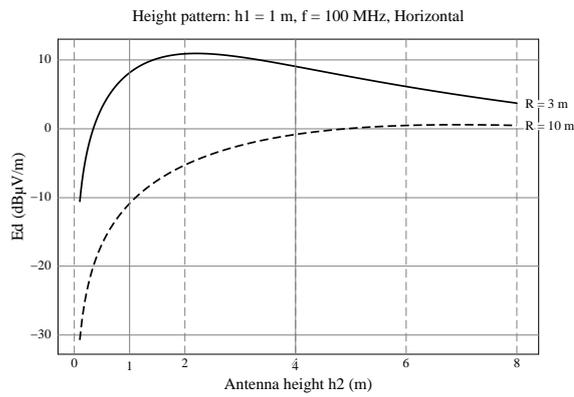
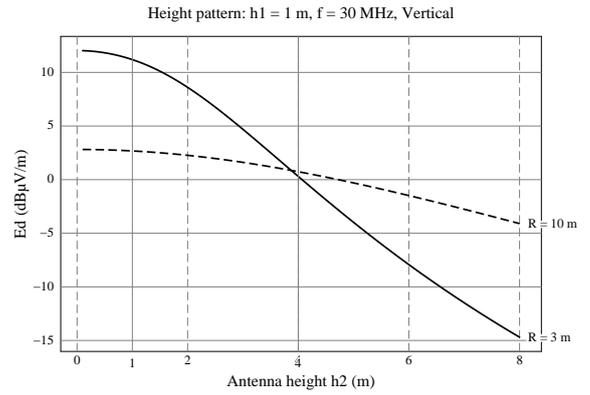
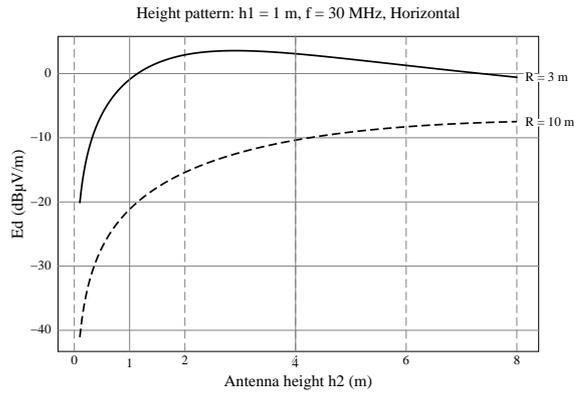
[2] *Searching for the elusive correction factor between 3m and 10m radiated emission tests*, E. Blankenship et al., IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2009, DOI: 10.1109/ISEMC.2009.5284614

A ハイパターン

A.1 $h_1 = 0.5$ m



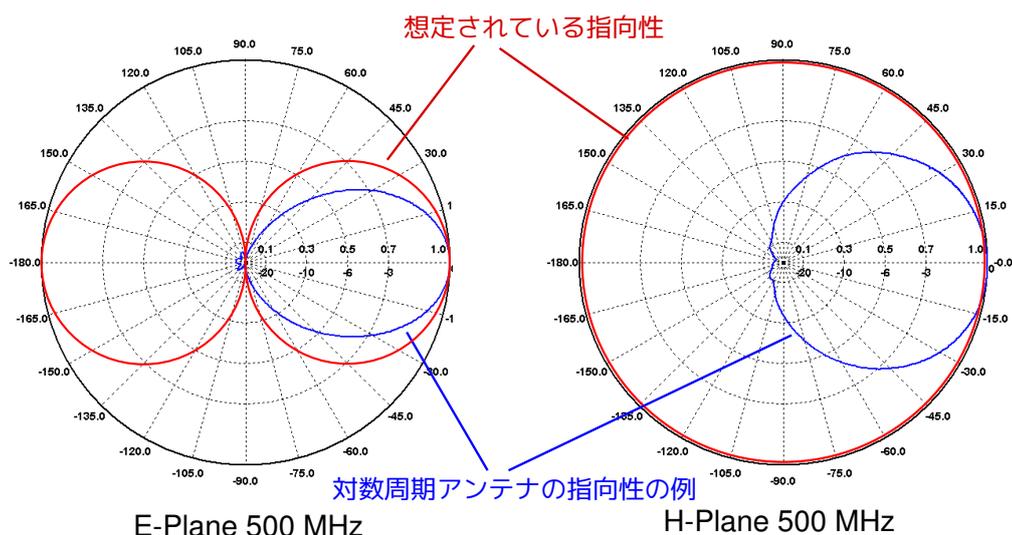
A.2 $h_1 = 1$ m



B アンテナの指向性の影響

ここでは、ダイポール・アンテナのような、H面内では指向性を持たず、E面内では $F(\theta) \simeq \sin \theta$ で近似できる指向性を持つアンテナを仮定してきた。

だが、対数周期アンテナ (LPDA) などのアンテナはこれと大きく異なった指向性を持ち、これは測定結果に影響し得る。



しかしながら、次のような理由から、本稿での議論はそのようなアンテナを使用した測定にも当て嵌まると考えられる:

- ダイポール・アンテナと異なり、LPDA はアンテナ前方に向けたビームを持つが、後方や側方の放射特性は測定にはあまり寄与しない。
- LPDA 前方の E 面内の指向性はダイポール・アンテナのそれよりも幾分鋭くなる傾向があるものの、ある程度似通ったものとなっている。
- ダイポール・アンテナと異なり、LPDA は H 面内でも顕著な指向性を持ち、これは水平偏波での測定に影響し得る。だが、先のハイトパターンに見られるように、測定距離 3 m では水平偏波では比較的低いアンテナ高でピークが得られる傾向があり、その場合、H 面内の指向性の測定結果への影響は小さいものとなる。