

〔研究〕

オープンサイトでのアンテナ特性測定

Measurements of Antenna Characteristics over Different Conducting Planes

森岡 健浩 小見山 耕司 中嶋 大介
T. MORIOKA K. KOMIYAMA D. NAKAJIMA

Electric field strength radiated from the electric devices should be weaker than the regulated strength to achieve the electromagnetic compatibility (EMC). The regulated field strength is to be determined by the national standard and the sensitivity of the equipments should be fairly equal to the national standard. The electromagnetic field standard for EMC measurements requires the high accurate measurement and evaluation techniques for the electromagnetic fields and antennas. In this research high accurate evaluation technique for the large national standard open-area test site is developed to achieve this aim. This report shows measurement results of dipole antennas by three-antenna method and they are evaluated by the comparison of the different types of open-area test site. Those results show that the repeatability of the derived antenna factors is within $\pm 0.3\text{dB}$ for the fixed element dipole antennas in the case of the same height measurement.

§1 はじめに

EMI計測をおこなう場合、アンテナは空間に分布する電磁界を計測する素子として用いられる。アンテナ係数(AF)はセンサーとしてのアンテナ特性を示す係数として広く用いられ、入射電界の測定器出力電圧に対する比として $AF=E/V(1/m)$ のように定義される。AFが得られると、測定器指示電圧とAFをかけることにより容易に電界強度を求めることができる。グラウンドプレーン上の2本のアンテナ間伝播減衰(SIL)を異なる3つのアンテナの組で測定し、3アンテナ法を用いることによって、文献[1]のようにAFを導出することができる。SILはオープンサイト(OATS)の特性に依存するため、ここでは複数のOATSで測定を行った。測定を行った5つのOATSのうち3つは溶接鉄板のグラウンドプレーンをもち(サイトB, D, E)、サイトAは金属メッシュのグラウンドプレーンをもつ。サイトCは金属メッシュのグラウンドプレーンの上をコンク

リートで覆った構造をもつ。本報告の全てのSIL測定はネットワークアナライザ(HP8753)を用いて行った。

§2 予測値と測定値

測定で用いたアンテナは共振ダイポールアンテナであるA, Bの2本とエレメント長調整式半波長ダイポールアンテナCである。ここで報告する測定結果では送受信アンテナ高が一般に異なる測定と送受信アンテナ高が同じとなる測定の2つの異なる3アンテナ法を行った。送受信アンテナ高はTable 1に示すとおりである。文献[1]では受信アンテナ高を1.0から4.0mの範囲で掃引し、最もSILが小さくなる高さを受信アンテナ高とすることとなっているが、この方法ではSIL最小点を探すことが困難であり、また測定に要する時間も長くなる。そのため、Table 1に示すようなSILが最小となると予測される高さ付近に受信アンテナ高を固定して測定を行った。アンテナ間の距離は

グランドプレーン上への投射で10.0mである。
 アンテナ端子間減衰は2端子回路を Fig.1 に示すように、3つ直列に接続したモデルと考えることができる。
 ここで、送受信バランのSパラメータ T 、 R とアンテナエレメント間のインピーダンス行列 A は以下に示すものとする。

送信バラン:
$$T = \begin{vmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{vmatrix} \quad (1)$$

アンテナ間:
$$A = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix} \quad (2)$$

受信バラン:
$$R = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{vmatrix} \quad (3)$$

文献[2]にある手順に従いアンテナ端子間の信号減衰は以下のように求めることができる。

Table 1 Antenna heights

	Different height		Same height	
	T. ant.	R. ant.	T. ant.	R. ant.
60MHz	2.00m	3.87m	2.00m	2.00m
180MHz		2.00m	2.00m	2.00m
400MHz		1.10m	1.38m	1.38m
700MHz		1.50m	1.82m	1.82m

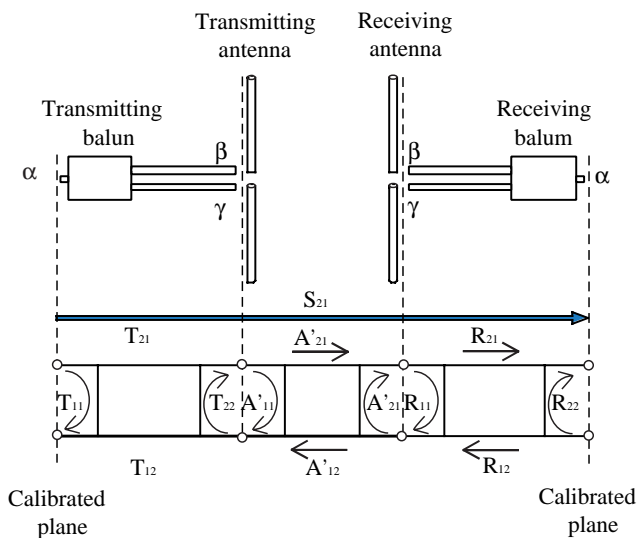


Fig.1 Calculation of SIL.

$$S_{21} = \frac{T_{21}A_{12}R_{21}}{(1-T_{22}A_{11})(1-A_{22}R_{11})-T_{22}A_{12}A_{21}R_{11}} \quad (4)$$

これを用いてSILは

$$SIL = 20 \log(1/|S_{21}|) \quad (5)$$

となる。ここで、SIL 予測値はNEC (Numerical Electromagnetics Code)を用いてアンテナ間のインピーダンス行列計算し、バランのSパラメータを測定することによって求めた。

§3 3アンテナ法

A F を測定により導出する手法として広く用いられているのが3アンテナ法である。この手法は、AFの未知なアンテナ3本のうち2本を用いて、異なる3通りの組合せで送受信アンテナ間の SILを測定する方法である。3本のアンテナのAFを3個の未知数として行なう3通りのアンテナ組み合わせの測定により、3つの連立方程式を得ることができるため、これを解いてA F を得る。

送信アンテナは電圧源 V_0 とアンテナの入力インピーダンス Z_i を用いて Fig.2 に示すような等価回路と考えることができる。同様に受信アンテナの等価回路はアンテナのインピーダンス Z_r とアンテナの実効長 h_{eff} を用いて Fig.3 に表される。AFは Fig.3 の空間電界と測定電圧の比として

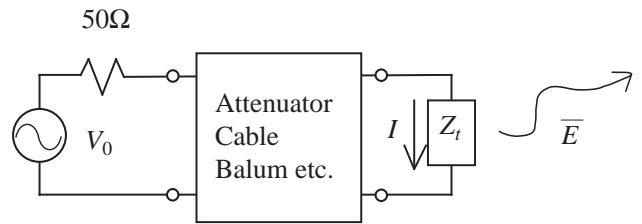


Fig.2 Equivalent circuit of a transmitting antenna.

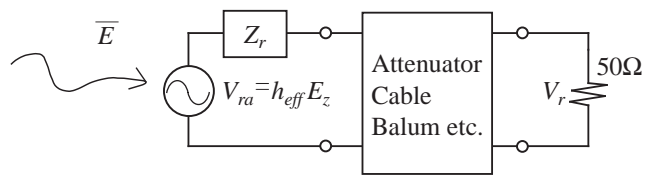


Fig.3 Equivalent circuit of a receiving antenna

$$AF_r = \frac{E_z}{V_r} \quad (6)$$

と定義される。ここで、 E_z は \bar{E} のダイポールアンテナ中心軸方向の成分である。

自由空間における送信アンテナから距離 d だけ離れた点における電界強度 E は放射電力 P_t アンテナゲイン G_t 、自由空間中の波数 β と波長 λ を用いて以下の様に表すことができる⁴⁾。

$$E = \frac{\sqrt{30P_t G_t}}{d} e^{-j\beta d} \quad (7)$$

ここで、 $P_t = \text{Re}(I^2 Z_t)$ と $Z_t = R_t + jX_t$ を用いると、

$$E = \frac{\sqrt{30R_t G_t}}{d} e^{-j\beta d} \quad (8)$$

と表される。ここで Fig.4 のように相反定理を用いて、送信アンテナを考えた場合、

$$h_{eff} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{G_t \text{Re}(Z_t)}{120}} \quad (9)$$

と、電源回路を見込んだ場合の抵抗 50Ω を流れる電流は

$$I = \frac{V_0}{50} = \frac{V_0}{50 h_{eff} AF_t} \quad (10)$$

であることから、

$$E_z = \frac{V_0 \pi \sqrt{120 \times 30}}{50 AF_t \lambda} \frac{e^{-j\beta d}}{d} \quad (11)$$

$$= \frac{V_0 f_M}{79.58 AF_t} \frac{e^{-j\beta d}}{d} \quad (12)$$

となる。ここで、 AF_t は送信アンテナの AF であり、 f_M

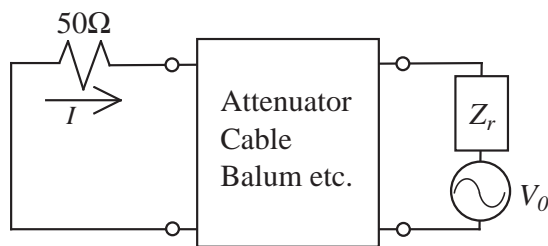


Fig.4 Reciprocity theorem applied to a transmitting antenna.

は MHz 単位で表された周波数である。

グランドプレーンが存在する場合は送信アンテナからの直接波だけではなく、グランドプレーンからの反射波が存在し、測定点ではこれらの合成波が観測されることになる。反射係数を $\rho_h = |\rho_h| e^{j\phi_h}$ とすれば、水平偏波を用いた場合の合成電界は

$$E_H = \frac{V_0 f_M}{79.58 AF_t} \left[\frac{e^{-j\beta d_1}}{d_1} + \frac{|\rho_h| e^{-j\beta d_2} e^{j\phi_h}}{d_2} \right] \quad (13)$$

と書くことができる。この振幅は

$$ABS(E_H) = \frac{V_0 f_M}{79.58 AF_t} \left[\frac{\sqrt{d_2^2 + d_1^2 |\rho_h|^2 + 2d_1 d_2 |\rho_h| \cos(\phi_h - \beta[d_2 - d_1])}}{d_1 d_2} \right] \quad (14)$$

である。

アンテナゲイン G_t は半波長ダイポールアンテナを用いた場合、1.64 dB となり、アンテナの放射電力 P_t を 1 pW とすれば、式(7)より観測点での E_{DH} 電界強度は次式のように表される。

$$E_{DH} = \sqrt{49.2} \left[\frac{e^{-j\beta d_1}}{d_1} + \frac{|\rho_h| e^{-j\beta d_2} e^{j\phi_h}}{d_2} \right] \quad (15)$$

$$ABS(E_{DH}) = \sqrt{49.2} \left[\frac{\sqrt{d_2^2 + d_1^2 |\rho_h|^2 + 2d_1 d_2 |\rho_h| \cos(\phi_h - \beta[d_2 - d_1])}}{d_1 d_2} \right] \quad (16)$$

ここで、Fig.5 に示すアンテナ配置を用いれば、

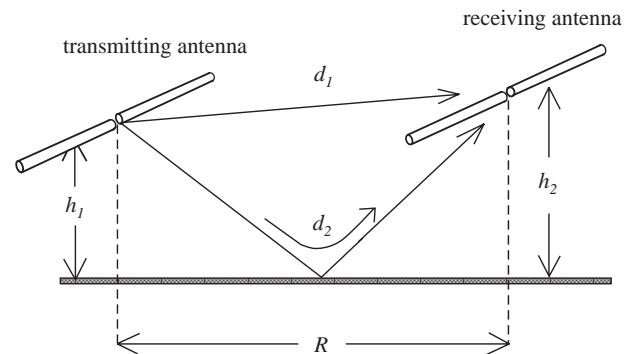


Fig.5 Antenna heights and distances.

$$d_1 = \sqrt{R^2 + (h_1 - h_2)^2} \quad (17)$$

$$d_2 = \sqrt{R^2 + (h_1 + h_2)^2} \quad (18)$$

$$\rho_h = \frac{\sin \gamma - (K - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma)^{1/2}}{\sin \gamma + (K - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma)^{1/2}} \quad (19)$$

また、 K と σ はそれぞれ比誘電率と導電率である⁵⁾。
受信アンテナを高さ $h_2^{\min} \leq h_2 \leq h_2^{\max}$ の範囲で固定した時の $ABS(E_{DH})$ の値を E_H^{fix} とすると、

$$E_H^{fix} = \frac{V_0 f_M E_{DH}^{fix}}{79.58 AF_i \sqrt{49.2}} \quad (20)$$

である。

サイトアッテネーションを、アンテナとの接合面における信号電圧 V_i と受信器の指示値電圧 V_r を用いて以下のように定義することが出来る。

$$Att = \frac{V_i}{V_r} \quad (21)$$

ここで、信号源とアンテナの整合が取れている場合には、

$$V_0 = 2V_i \quad (22)$$

の関係が成り立つ。ここで、式(6)と(22)を(21)に代入することによって以下の関係式を得る。

$$Att = \frac{V_0 AF_r}{2E_z} \quad (23)$$

この式の電界 E_z に受信アンテナを固定した時の値 E_H^{fix} を代入すると、

$$Att = \frac{79.58 AF_i AF_r \sqrt{49.2}}{2 f_M E_H^{fix}} = \frac{279.1 AF_i AF_r}{f_M E_H^{fix}} \quad (24)$$

デシベル表記では

$$Att(dB) = -20 \log f_M + 48.92 + AF_i(dB/m) + AF_r(dB/m) - E_H^{fix}(dB \cdot \mu V/m) \quad (25)$$

である。

3 アンテナ法での測定対象である3本のアンテナのAFをそれぞれ AF_1 、 AF_2 、 AF_3 とおく。アンテナ1と2を組み合わせて行った測定のSILを A_1 、アンテナ1と3の組合せの場合は A_2 、アンテナ2と3を組み合わせた

場合の値を A_3 とすれば、式(24)によって以下の連立方程式が得られる。

$$AF_1 AF_2 = \frac{f_M E_H^{fix}}{279.1} A_1 \quad (26)$$

$$AF_1 AF_3 = \frac{f_M E_H^{fix}}{279.1} A_2 \quad (27)$$

$$AF_2 AF_3 = \frac{f_M E_H^{fix}}{279.1} A_3 \quad (28)$$

この連立方程式を解くことによって3つのAFを求めることができて、以下の式のように表される。

$$AF_1 = 10 \log f_M - 24.46 + \frac{[E_H^{fix} + A_1 + A_2 - A_3]}{2} \quad (29)$$

$$AF_2 = 10 \log f_M - 24.46 + \frac{[E_H^{fix} + A_1 + A_3 - A_2]}{2} \quad (30)$$

$$AF_3 = 10 \log f_M - 24.46 + \frac{[E_H^{fix} + A_2 + A_3 - A_1]}{2} \quad (31)$$

(29)から(31)に測定値を代入することによりAFを得る。

§4 測定結果及び考察

4.1 アンテナ組合せ及び測定法による差異

複数のサイトでのSILの測定には送受信アンテナの高さに関して、等高と非等高の方法を採用し比較を行った。ただし、180MHzでは全ての測定で送受信アンテナが等しい高さになる。Fig.6にアンテナの組合せと測定法別に、それぞれの測定の平均値からの最大偏差を示す。いずれのアンテナ組合せにおいても、測定周波数が高くなるほど測定平均値からの最大偏差が大きくなる。これは外部到来波の影響に加えて、アンテナマストなど周囲反射物からの反射波の影響もあると考えられる。図では等高測定と非等高測定の結果を同時に示しているが、顕著な差異は見られない。測定を行った送受信アンテナ高の組み合わせは直接波と反射波が同相となるよう理論的に設定した。実際に直接波とグランドプレーン反射波

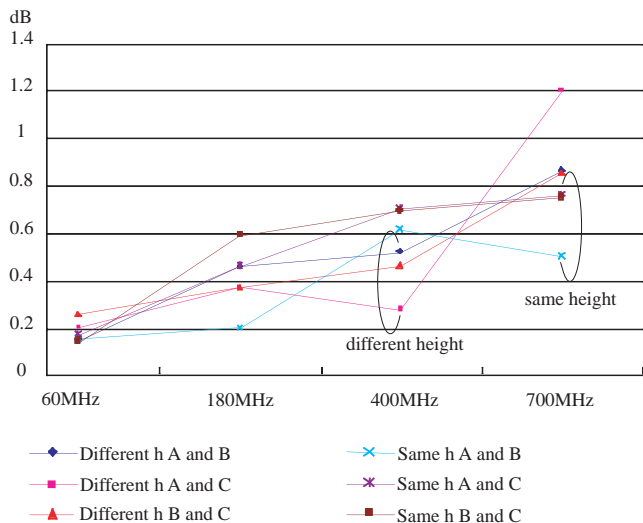


Fig.6 Deviations for the antenna combination.

の合成電磁界が同相加算されず十分でなかった場合は、外部到来波の影響を受けて変動が大きくなるため、測定手法としての等高測定と非等高測定の厳密な比較を行なうことが難しくなる。

4.2 OATSの違いによる差異

グラウンド平面的の構造は金属メッシュと溶接接合の金属板である。サイトAとサイトCがメッシュグラウンド平面あり、サイトB、D、Eが溶接鉄板グラウンド平面をもつ。Fig.7にアンテナAとBの組合せを用いて、非等高アンテナで測定した4周波数におけるSILの基準値からの偏差を示す。偏差の基準値は測定の平均値である。この図から、各サイトにおける測定値の再現性はサイトCの700MHzとサイトBの400MHzを除いて $\pm 0.2\text{dB}$ 以内であり、サイトごとに測定値がまとまり、サイトごとの傾向を推測することが可能であることがわかる。また、測定周波数が高くなるほど同一サイトの測定値でも分布範囲が大きくなる傾向がある。高い周波数ほど測定値分布が大きくなるのは、アンテナマスト及びアーム等の周囲誘電体構造物の影響と、ハイトパターンの周期が細くなるためにアンテナ設置高の精度がより厳しくなるためと思われる。また、サイトAの値のみが各周波数で他のサイトの値と異なっており、グラウンド平面的の平坦度や接地等に問題があると考えられる。

4.3 非等高アンテナ測定

Fig.8に非等高アンテナ測定でのSILの予測値からの偏差を示す。予測値と比較される測定値は固定長エレメントをもつ共振ダイポールアンテナAとBの組を用いた場合のSILである。アンテナAとBのバラ特性を測定したものをを用いて求めたSIL予測値を基準としてある。もう一方のSIL予測値はアンテナAとBの組に付随してあるバラの特性を用いた計算値である。このバラのSパラメータ測定にはネットワークアナライザHP8753Eを用いて行った。また、送受信アンテナ間のインピーダンス行列を求めるためにNECを用いている。つまり、2つの予測値の違いは送受信バラの特性の違いに起因するものである。これら計算値の最大の違いは60MHzにおける0.1dBである。この要因として最も考えられることは以前にFig.1のバラ端子のコネクターを接触不良で別の物と交換したことだと考えられる。各周波数において測定

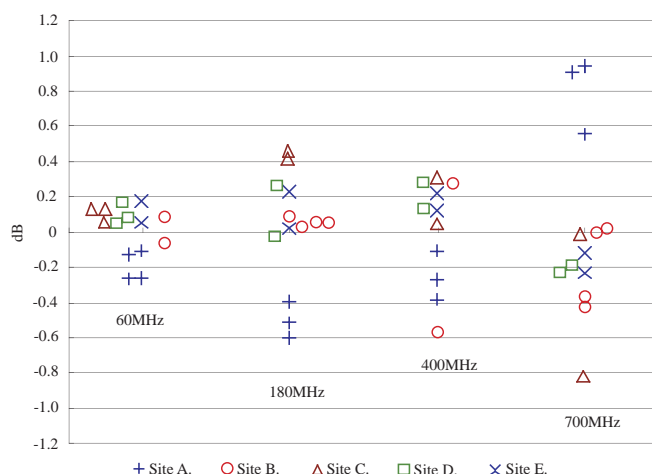


Fig.7 SILs with antennas A and B.

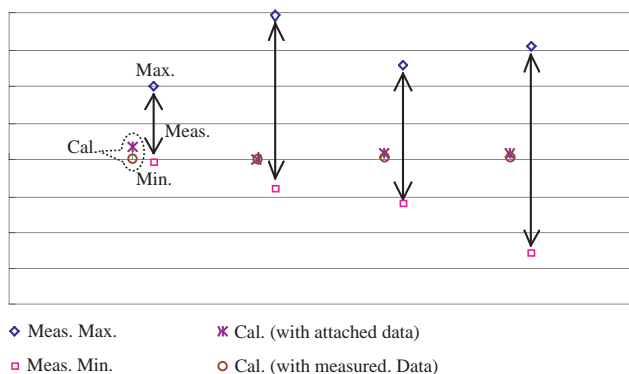


Fig.8 SIL deviations from the predicted SIL

値は予測値付近に分布しており，予測値と測定値の差は周波数が高くなるほど大きくなっている。また両者の差は最大で180MHzにおける0.7dB程度である。

4.4 非等高アンテナ測定によるAF

受信アンテナ高を1～4mの範囲で昇降させ，その受信信号が最大となる高さにアンテナを固定するANSI規約は最大受信点の特定が困難である。種々のパラメータについて測定結果ごとの比較を行うことを考慮して，Table 1 のように高さを予め設定したアンテナ組み合わせAとB，AとC，BとCの3組のSIL測定値から導出された各アンテナのAFを Fig.9 に示す。基準値は各周波数における全ての測定から導出されたAFの平均値である。

測定を行った4つのサイトでの測定値の再現性は測定周波数によって異なるが，400MHz以下のアンテナAとBでは最大約±0.25dBである。700MHzでの測定は分散が広がり，最大±0.6dBである。アンテナCのAFはアンテナA，Bと比較して，周波数が高くなるにつれてAFのばらつきが大きくなる。これは，アンテナCがエレメント長を各周波数で半波長となるように調整する形式のアンテナであり，同じ設定誤差でも高い周波数になる程影響が大きいことによる。ここで，180MHzの分散の方が400MHzの分散よりも大きい，この原因として，アンテナ高さの設定や，外部到来波等の影響が挙げられる。また，サイトCの700MHzの測定では平均値から+3.93dBと大幅にずれているものがあり，受信アンテナの高さが正確に1.50mに設置されなかったなど，アンテナ設置後の確認が重要であることがわかる。

一般的にANSI規定の測定を行った場合，受信アンテナを1～4mの範囲で掃引して，SILが最小となる高さに受信アンテナを設置するため，送受信でアンテナ高が異なる。OATSでの測定はグラウンドプレーンが近距離に存在し，アンテナ高に依存してアンテナとグラウンドプレーン間で電磁結合をもつためAFに影響を及ぼし，送受信でアンテナ高が異なる場合では，全く同じアンテナを用いてもAFが変化するなどの高さ依存性が存在する。このことによりANSI規約によるAF導出には，以下の問題点が含まれていると考えることが出来る。

AFには高さ依存性があるために，高さが異なる送

受信アンテナでも単一のAFを仮定しているANSI規約による測定ではAFを正確に決定できない。AFを導出する(29)～(31)の式は，導出過程においてアンテナ間(イメージも含む)の相互結合は考えられていない。アンテナは自由空間における共振ダイポールであり，リアクタンス成分を持つアンテナ，及びグラウンドプレーン上に置くことによってイメージとのカップリングが生じ，リアクタンス成分を持った場合等は考慮されていない。

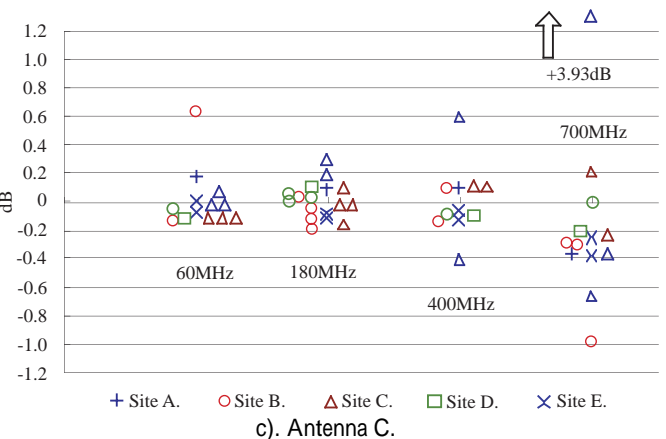
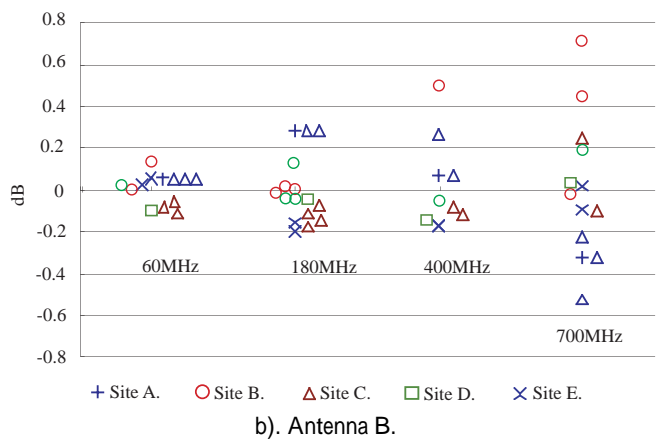
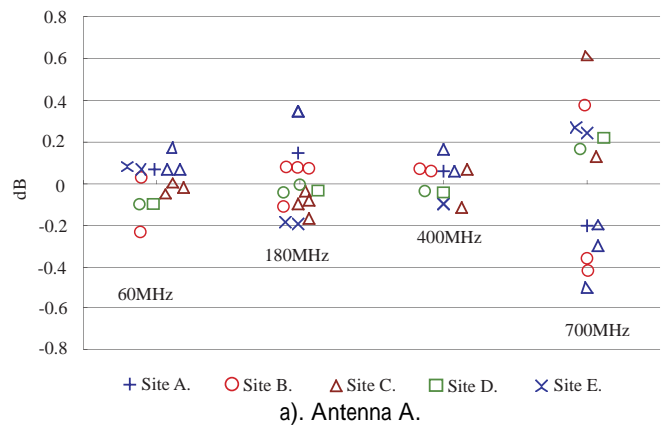


Fig.9 Antenna factors for antennas A, B and C.

4.5 等高アンテナ測定によるAF

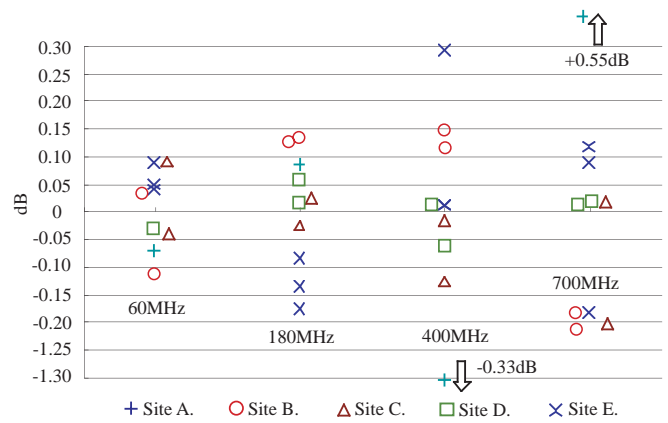
非等高3アンテナ測定の問題のうち、AFの高さ依存性による問題に対処するために、同一の送受信アンテナ高を採用した測定を行った。送受信アンテナ高は直接波とグランドプレーンからの理想的な反射波が受信アンテナ上で同相となるように設定した(Table 1 参照)。この設定で各アンテナのAFを導出したものを Fig.10 に示す。縦軸の基準値(0dB)は各周波数におけるAF 導出結果の平均値である。サイトA での測定から求めたアンテナA のAF が、400MHzにおいて-0.33dB、700MHzにおいて+0.55dBと大きくずれていることを除くと、送受信アンテナで高さが異なる場合のAF に比べて最大の偏差が ± 0.25 dB程度であり、Fig.9 の最大偏差である ± 0.7 dBに比較して平均からのずれがかなり小さくなっていることがわかる。サイトA でのAF が大きく他のオープンサイトの傾向から外れている原因は、測定の際にアンテナのコネクター部が破損していたためであると考えられる。破損が起っていたのは1本のアンテナのみであるが、AFの導出過程では他アンテナのAFにもこの影響がでる。

アンテナCのAFは偏差が ± 0.6 dB程度とアンテナA、Bの二本に比べて大きく、周波数が高くなるにつれて分散が大きくなっている。前述のようにアンテナCのエレメントが伸縮性でありエレメント長の設定誤差の影響が高い周波数になるほど大きいことなどが原因であると考えられる。

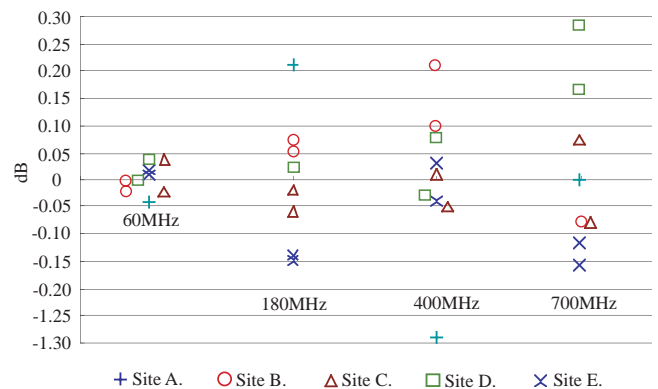
§5 まとめ

本報告では測定時の種々の要因により生じるアンテナ係数のばらつきの評価を行うために、いくつかの異なるオープンサイトで行った3アンテナ法によって導出したアンテナ係数を比較評価した。これによって、導出されたアンテナ係数の再現性は等高3アンテナ法を用いた場合で ± 0.3 dB以内に抑えることが困難ではないことが判明した。測定のばらつきの評価に加えて、その値を真値に近づけるためにアンテナ係数の計算による予測を行うことが今後の課題である。また、アンテナ測定精度を向上させるためにアンテナ配置などの測定手法の検討も同時に行なっていく。

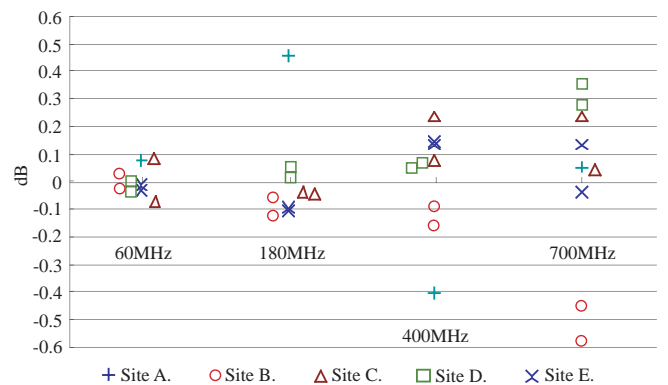
さらに、ダイポールアンテナのみでなくバイコンカルアンテナ、ログペリオディックアンテナ等の様々な形状と機能を有するアンテナを対象にアンテナ間伝播減衰の測定技術を研究蓄積し、アンテナ係数を高精度に評価するための技術基盤を確立することが実用的なアンテナ標準には必要であろう。同時に、数値解析によるアンテナ特性の評価技術の高精



a). Antenna A.



b). Antenna B.



c). Antenna C.

Fig. 10 Antenna factors for antennas A, B and C

度化は測定と理論的評価が相互に比肩し合えるレベルまで引き上げられ標準技術として実用化されれば、標準確立に貢献することが期待できる。

謝辞

本測定はNEDO即効型提案公募事業による助成により行なわれた。オープンサイトで行なわれた本測定に御協力頂きました、株式会社トーキンイ・エム・シ・エンジニアリング増田知彦部長，ならびに佐藤稔主務に感謝します。

参考文献

- 1) American National Standards Institute, 'American National Standard for calibration of antennas used for radiated emission measurements in electromagnetic interference (EMI) control,' ANSI C63.5, 1988.
- 2) B. G. Loader, M. J. Alexander and M. J. Salter, "Reduced measurement uncertainty in the frequency range 500MHz to 1GHz using a calculable standard dipole antenna," NPL Report CEM S17, Jan. 1998.
- 3) A. A. Smith, 'Standard-site method for determining antenna factors,' IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, EMC-24, pp. 316-322, Aug. 1982.
- 4) A. A. Smith, "Calculation of site attenuation from antenna factors," IEEE Trans. On Electromagn. Compat., EMC-24, pp.301-316, Aug. 1982.
- 5) K. Bullington, "Radio propagation at frequencies above 30 megacycles," Proc. IRE, pp.1122-1136, Oct., 1947

(2000.1.31受付)