# 1GHz 超の EMI 測定における測定アンテナの チルト角と EUT テーブルの影響について

鶴田 誠、臼井 亮(電子技術部 電磁環境グループ)

# 1. はじめに

2020年のサービス開始を目指している第5世代移動通 信システムや次世代の車載用ミリ波レーダーシステムを 始めとする無線システム・各種コンピュータシステムの 高速化・高機能化による電子機器の相互接続などに起因し た電磁妨害波干渉が発生し易い状況が増加している.

このような背景から電磁両立性 EMC(Electro-Magnetic Compatibility)の重要性が日増しに高まっており、これに伴い測定規格が随時改定されている.

電磁妨害波干渉に関連する FCC(ANSI C63.4-2014)が新 しく規定されたが、この規定に対する測定データが十分で ない. 加えて、1GHz 超の EUT 用テーブルの影響に関する 測定データも十分とは言えない.

本報告では、米国の規格である FCC(連邦通信委員会)と 日本国内の自主規制である VCCI(一般財団法人 VCCI 協 会)における、1GHz 超の EMI(Electro Magnetic Interference) 測定における測定アンテナのチルト角と EUT(Equipment Under Test)用テーブルの影響の違いについて測定した結 果及び理論計算により検証した結果に関して報告する.

## 2. VCCI による 1GHz 超の測定方法

VCCI による 1GHz 超の測定方法は,次の(1)から(3)のと おりである.図 1(a)(b)に EUT と受信アンテナの配置の関 係を示す.



図1 VCCI の測定方法における EUT の高さと受信アンテナの高 さ

- (1) テストボリュームと受信アンテナ間の距離は3[m]
- (2) 受信アンテナ高は 1[m]に固定する. EUT の高さが 3[dB]ビーム幅を超える場合は、受信アンテナの高さ を掃引

EUT の設置しているターンテーブルを回転させて尖頭値 と平均値の最大値を記録

# 3. 新しい FCC の測定方法の紹介

#### 3.1. 測定方法の概要(ANSI C63.4-2014)

今回の報告で対象とする新しい FCC (以下,「新しい FCC」を「FCC」と省略する)の測定方法は,図 2に示すと おり受信アンテナ高を変化させたときに受信アンテナの メインローブが EUT の指定位置を常に向くように自動的 にチルト(仰角)を自動的に制御することが必要となる. このメインローブが EUT 側を常に向いているために,EMI 測定において厳しい条件設定になる場合がある.



図2 新しい FCC の測定方法

#### 3.2. アンテナ仰角・偏波切替器

FCC の測定方法に対応するために導入したアンテナ仰角・偏波切替器(EL/VH ポジショナ)を図 3に示す. EL/VH ポジショナは,(株)デバイス製の DW3404AV1/O EL/VH ポ ジショナ・DW3138AV1/O ポジションコントローラ(仰角・ 偏波切替)であり,表1にポジショナの仕様を示す.測定 可能周波数の下限は,製造メーカの仕様から700[MHz]と なっている.



図3 EL/VH ポジショナ(赤枠がポジショナ本体)

|--|

	偏波切替部	仰角部	
全体の寸法	145(W)×127(H)×360(D)[mm]		
回転移動範囲	0から 90°	10°から-90°	
スピード	0.37 から 3.7rpm	3.2 から 8°/秒	
分解能	0.1°		
偏波切替精度	±0.1°		
位置決め精度	0.2°	0.2°(-45°まで)	
質量	約 3.9kg		

# 4. 実験方法

## 4.1. 実験条件

FCC/VCCI 技術基準の方法等に準じて、1[GHz]から 18[GHz]のテーブルの影響について測定した(図 4及び図 5 を参照).テーブルは、①発泡スチロール製のテーブル② FRP 製のテーブル③木製のテーブルの3種類を用いた.送 信側は小型バイコニカル、受信側はホーンアンテナを使用 した.送受信間のアンテナ間の距離は3[m]とした.送信 アンテナ高は床面から0.9[m]である.送受信アンテナ間の S21 特性(伝送特性)をネットワーク・アナライザで測定し た.キャリブレーション後のS21特性であるCS21特性は、

#### (CS21 特性)

= (テーブル設置時の S21) - (テーブル非設置時の S21)

と計算した.測定では、次の2種類の受信アンテナのパラ メータを調整している.

(1)受信アンテナ高 1[m]から 4[m]まで変化

(2)受信アンテナのチルト角を固定(水平方向に固定)・調整 (送信アンテナ側を向くように自動調整)

尚,送受信アンテナ間の床面には電波吸収体を設置している.ただし、テーブル周辺の床面には、電波吸収体を設置してない.





チルト角を固定 チルト角を調整 4m 1m

図5 受信アンテナの高さとチルト角を調整

## 4.2. 使用測定器

本測定に使用した主要な測定器を表 2に示す.

表2 測定器リスト

周波数帯	測定器名称	型名	製造会社
1-8GHz	ネットワーク・アナ ライザ	ZNB8	Rohde&Schwar z
	送信アンテナ (小型バイコニカル)	SBA9119	Schwarzbeck
	受信アンテナ (ホーン)	BBHA9120B	Schwarzbeck
	電力増幅器	MLA-0108-B 02-42	TSJ
	送信側 ATT	10dB	
6-18GHz	ネットワーク・アナ ライザ	E8363B	Keysight
	送信アンテナ (小型バイコニカル)	SBA9112	Schwarzbeck
	受信アンテナ	MDH0218	マイクロウェ
	(ホーン)		ーブ ファクト
			<u>у</u> —
	電力増幅器	ECS-1505S	ELENA
	送信側 ATT	10dB	

# 5. データ解析及び電波伝搬に関する理論

本報告での理論的な解析対象は, EMI 測定において VCCIの測定方法に比較してFCCの測定方法が厳しい条件 となる部分に注目する.図6の反射波2は,電波吸収体を 介して反射される電磁波であるために,反射波の電力が少 なくとも30[dB]以上の減衰が期待される.他方,ターンテ ーブル直下の金属面から反射する反射波1は,金属面から 直接反射して受信アンテナに向かうために強い電磁波と して受信アンテナで受信される.そのために、本報告では EMI 測定の観点で厳しい条件となりうる直接波及び反射 波1を取扱う.

また、紙面の関係で厳密な理論的な議論よりも EMI 測 定に対する現象の理解・把握など観点で纏めている.





# 5.1. 直接波と反射波の経路情報(遅延プロファイ ル)

送信アンテナから受信アンテナまでの複数の経路の情報であるチャネルインパルス応答 h(t, t)と伝達関数 H(f, t) は、次の通りに与えられる<sup>[1][2]</sup>.

$$h(t,\tau) = \sum_{l=0}^{\infty} h_l(t) \delta(t-\tau_l)$$
(1)  

$$H(f,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(h,t) \exp(-j2\pi f t) dt$$
$$= \sum_{l=0}^{\infty} h(h,t) \exp(-j2\pi f l \Delta t)$$
(2)

ここでは、チャネルインパルス応答が、遅延プロファイ ルに対応する.一方、伝達関数が CS21 特性に対応する. 本報告で検討するのは、主にターンテーブル付近の電波吸 収体を設置できない床面による反射波と直接波で発生す る2パスのマルチパスを想定している.しかしながら、現 実にはアンテナマストなどの構造物からも弱い反射が発 生している点にも注意を払う必要がある.2パスのマルチ パスの遅延プロファイル及び CS21 特性は、

$$h(t,\tau) = h_0(t) + h_1(t)\delta(t-\tau_1)$$
(3)  

$$H(f,t) = h_0(t) + h_1(t)\exp(-j2\pi f \Delta \tau_1)$$
  

$$= h_0(t) \left(1 + \frac{h_1(t)}{h_0(t)}\exp(-j2\pi f \Delta \tau_1)\right)$$
(4)

と表される.2パスのマルチパスのCS21特性の絶対値は, 次式の通りに表される.

$$|H(f,t)|^{2} = |h_{0}(t)|^{2} + |h_{1}(t)|^{2} + 2|h_{0}(t)||h_{1}(t)|\cos(2\pi f \Delta \tau_{1})$$
<sup>(5)</sup>

つまり、反射波によるレベル変動幅は、 $4|h_0(t)||h_1(t)|$ の影響を受ける.そのために、反射波の受信レベルに強く依存 することが理解できる.VCCIのEMI測定では、 $h_1$ が電波 吸収体で吸収される.そのために、 $h_1$ が小さくなり2パスのマルチパスの影響が小さくなる.

この関係式から FCC の場合には,2パスのマルチパスの 第3項の影響により,図7に示す通りの周波数領域でのレ ベル変動を生じることになる.

$$H(f,\tau) = \frac{|h_0(t)|^2 + |h_1(t)|^2 + 2|h_0(t)||h_1(t)|}{|h_0(t)|^2 + |h_1(t)|^2 - 2|h_0(t)||h_1(t)|}$$
  
Bigs

#### 図7 2パスのマルチパスの周波数方向の変動

ここで,2 パスのマルチパスの影響を確認するために, 金属面の反射の損失等がなくて自由空間の損失のみを考 慮した場合の2パスのマルチパスのCS21特性を考える. この場合のCS21特性は,次式で与えられる.

$$\left|H(f,t)\right|^{2} = \left(\frac{4\pi d_{0}f}{c}\right)^{4} \left(1 + \left(\frac{d_{1}}{d_{0}}\right)^{2} + 2\left(\frac{d_{1}}{d_{0}}\right)^{2} \cos(2\pi f \Delta \tau_{1})\right)$$
(6)

ただし、 $d_0$ は直接波の経路・ $d_1$ は反射波の経路・cは光速 である.また、 $\Delta \tau_1$ は、

$$\Delta \tau_1 = \frac{(d_1 - d_0)}{c} \tag{7}$$

で与えられる. この CS21 特性は, d₀は直接波の経路・d₁ は反射波の経路が同一の場合には, CS21 特性が定数にな ることが理解できる. つまり, 電磁波の発信源が床面に近 い場合には,式(6)から CS21 特性の変動幅が小さくなる方 向に向かうこと理解できる.

この関係から受信アンテナ高に対する理論上の周波数 に対するレベル変動を計算すると図8に示す結果となる. 図8の任意の周波数を固定して切出したグラフは,ハイト パターンと呼ばれる(図9を参照).このように式(6)であっ ても、2パスのマルチパスの影響により周波数とアンテナ 高に対して複雑な応答を示すことが解る.VCCIの測定方 法は、多くの測定対象が受信アンテナ高を固定して測定す るケースが多い.また、送信及び受信アンテナ高の関係か ら、電波吸収体の効果が期待できるために2パスのマルチ パスの影響は小さくなる.一方、FCCの測定方法では、受 信アンテナにチルト角を調整する機構が存在するために 図8のような複雑な2パスのマルチパスの影響を受けるこ とになる.



図8 受信アンテナ高・周波数に対する CS21 特性



## 5.2. 水平偏波と垂直偏波のレベル差

水平偏波(H)と垂直偏波(V)の相違により,一般に反射波 のレベルが異なる.垂直偏波に比較して水平偏波の反射波 のレベルが高くなる.この水平偏波のレベルが高くなる要 因について説明する.水平偏波及び垂直偏波の本質的なレ ベル差が生じるメカニズムについて,理想的なダイポール アンテナを用いて説明する.水平偏波の受信電界強度は,

$$E_{H} = 7.0 \frac{\sqrt{d_{1}^{2} + |\rho_{h}|^{2} d_{0}^{2} + 2d_{0}d_{1}|\rho_{h}|\cos(\phi_{h} - \beta(d_{1} - d_{0}))}}{d_{0}d_{1}}$$
(8)

と表される<sup>[3]</sup>. ただし, β は波数を表す. また, φh は ph の 位相で与えられる. 金属面の反射係数 ph は, 次式で与え られる.

$$\rho_{h} = \frac{\sin\gamma - \sqrt{K - j60\lambda\sigma - \cos^{2}\gamma}}{\sin\gamma + \sqrt{K - j60\lambda\sigma - \cos^{2}\gamma}}$$
(9)

ただし、 $\gamma$ は大地面への入射角・Kは大地面の比誘電率・ $\sigma$ は大地面の導電率・ $\lambda$ は波長とする.

一方, 垂直偏波の受信電界強度は,

$$E_{v} = 7.0 \frac{R^{2} \sqrt{d_{1}^{6} + \left|\rho_{h}\right|^{2} d_{0}^{6} + 2d_{0}^{3} d_{1}^{3} \left|\rho_{v}\right| \cos(\phi_{v} - \beta(d_{1} - d_{0}))}}{d_{0}^{3} d_{1}^{3}}$$
(10)

と表される<sup>[3]</sup>. また,  $\varphi_v$ は  $\rho_v$ の位相で与えられる.ただし, 垂直偏波の場合には, E 面内では顕著な指向性を持つため に, その指向性を次式で近似して取扱う.

$$F(\theta) \cong \sin \theta = \frac{R}{4} \tag{11}$$

ただし、R はアンテナ間の水平面の距離である.本報告で は、R は 3[m]である.また、金属面の反射係数  $\rho_v$ は、次 式で与えられる.

$$\rho_{\gamma} = \frac{(K - j60\lambda\sigma)\sin\gamma - \sqrt{K - j60\lambda\sigma - \cos^2\gamma}}{(K - j60\lambda\sigma)\sin\gamma + \sqrt{K - j60\lambda\sigma - \cos^2\gamma}}$$
(12)

式(8)と式(10)の関係から理論上の受信アンテナ高と水 平偏波と垂直偏波の電界強度差の関係を計算すると図 10 に示す結果となる(受信アンテナ利得を含まない). この結 果から受信アンテナ高が高くなるに従って電界強度のレ ベル差が大きくなることが解る.また,水平偏波成分が強 く影響が表れることも理論的に確認できる.これらの電界 強度の差は,主にアンテナパターン及び反射係数で決定さ れる. VCCIの EMI 測定では,受信アンテナ高を 1[m]に固 定して測定するケースが多いために,水平偏波と垂直偏波 が同程度の影響と考えることができる.

なお,テーブル材質による相違に関しては,誘電体を含む詳細な理論展開が必要であり,紙面の関係で割愛する.



図10 反射波の水平偏波と垂直偏波の電界強度の差

#### 実験結果

#### 6.1. 水平偏波・垂直偏波によるレベル差

水平偏波と垂直偏波によるレベル差について,実測デー タの遅延プロファイルを図 11に示す.この遅延プロファ イルは,EMI測定で使用される発泡スチロールのテーブル を使用した場合である.

図 11の遅延プロファイルの結果の相対レベルが - 30 [dB]以下の領域の成分は、測定治具等の影響で生じたマル チパス成分になる.このマルチパスが生じた部位は、例え ばアンテナを固定するアンテナマストなどが挙げられる. また、相対レベルが一定かつ大きいところ(図 11の実線で 囲んだエリア)は直接波を表し、相対レベルが変化してい る部分(図 11の破線で囲んだエリア)は、テーブル付近の金 属床面による反射波を表している.ただし、図 11は直接 波の値で受信アンテナごとに正規化している.

次に、実測の水平偏波と垂直偏波の遅延プロファイルの 反射波の電界強度のレベル差を整理した結果を図12に示 す.図11の遅延波の測定結果等から、3.0[m]以下は電波吸 収体による反射波の抑圧があることが解る.一方で、 3.5[m]以上は、電波吸収体による反射波の抑圧されずに大 きく受信アンテナで受信される.そのために、EMI 試験に おける影響の度合いが大きくなる受信アンテナ高が 3.5[m]及び4.0[m]を比較している.受信アンテナの指向性 特性は、アンテナに付属している指向性特性を利用してい る.この結果によれば、ターンテーブルの下の金属面によ り発生する反射波は、FRPのテーブル及び発泡スチロール のテーブルに関しては理論計算値と良い一致を示してい る.ただし、発泡スチロール並びにFRPの誘電体による 遅延時間は計算に含めていない.ところで、木材のテーブ ルは、理論計算値とギャップが生じていることが解る.こ れは、木材自身及び木材に含まれる水分などの誘電物質が 影響を与えていると考えられる.

EMI 測定の観点では,送信アンテナ(EUT)の給電点等の 電力について,水平偏波と垂直偏波が同レベルである場合 には,水平偏波の影響が大きくなる傾向に作用することに 注意を払う必要がある.水平偏波の作用を抑圧するために 水平面内の等価的なグランドの強化による問題解消など の施策が重要になる.





#### 6.2. FCC の測定方法と VCCI の測定方法の比較

図 13に FCC の測定方法と VCCI の測定方法を比較した 測定結果を示す(受信アンテナ高 1[m]から 4[m]の中の最大 値). この測定結果が示すとおりに, FCC 測定方法は, VCCI の測定方法に比較して 2 パスのマルチパスの影響を大き く受けることが解る. そのために, EMI 測定の観点では, 直接波と反射波が共に評価されるために、VCCIの測定方法に対して FCC の測定方法が厳しい評価条件になる場合がある.

また,測定結果である図 13は,金属面による反射波以外 のアンテナマストや受信アンテナ高などの高さによる電 波伝搬の影響などを全て含んでいる.そのために,2パス のマルチパス以外の成分も確認することができる.



図13 測定方法の違いと CS21 特性

### 6.3. テーブル材質と CS21 特性

図 14並びに図 15にテーブル材質による CS21 特性の差 異を示している. 全周波数帯に渡って発砲スチロールの影 響が小さいことが図 14及び図 15から確認できる. ただし, FCC の測定方法は, VCCI の測定方法に比較して CS21 特 性の変動幅が大きくなっている. また,電波伝搬に関する 理論の章で計算したように水平偏波の影響が垂直偏波に 比較して大きい事が確認できる. ただし,理論解析の章で は,水平偏波として設置しているアンテナが十分に金属面 から離れていると想定している. そのために,ターンテー ブル上に設置して測定する装置などは, EUT の設置する 高さ及び EUT の電磁波の発生源の位置関係に依存して, 水平偏波成分が垂直偏波成分に比較して小さくなる場合 も言及しておく.

#### 考察及び今後の展開

電波伝搬等の理論的な考察から床面が金属面(それ以外 の面は電波吸収体を設置)の環境では、垂直偏波に比較し て水平偏波の方が反射波の影響が大きいことを理論的な 観点で確認した.実測の結果も反射波の水平偏波成分が強 いことが確認された.

FCC の測定方法と VCCI の測定方法を比較してきた. その結果として, FCC の測定方法 (チルト角と EUT 用テーブルの反射の影響)では,床面の反射と直接波の 2 パスモ

デル により測定値が変動するマルチパスが発生する. その結果として,発泡スチロールのテーブルがある場合には,水平偏波の1から6[GHz]では,最大4[dB]程度の影響が発生する.また,6から18[GHz]では,最大5[dB]程度の影響が発生する.

今後は、マイクロ波の評価実績を活用して、ミリ波帯の 測定技術及び測定サービスの提供に関して検討していき たい.



ナ社, (2003)

3. AlbertA.Smith, Jretal., "Calculation of Site Attenuation from Antenna Factors," IEEE Trans., Electromagnetic Compatibility, vol.EMC-24, no.3, 1982.

【外部発表】口頭発表 1件(2018/9IEICEソ大予定)