KISTEC における放射エミッション測定の

不確かさの評価

臼井 亮、鶴田 誠(電子技術部 電磁環境グループ)

1. はじめに

KISTECでは、1995年より電波暗室・電磁波シールド室 において EMC (電磁両立性: electromagnetic compatibility) 試験業務を開始し、これまで、多くの企業の方にご利用い ただいている。

EMC 試験には大きく分けて2種類のものがあり、一つは、電子機器から発生する不要な電磁ノイズが規格で決められた限度値以下に収まっているかを評価する EMI

(Electromagnetic Interference:電磁妨害)測定。もう一つ は、規格で決められた電磁ノイズを電子機器へ与えて耐性 能力を評価するイミュニティ(耐性: immunity)試験であ り、これらの EMC 試験は電子機器の開発において不可欠 なものとなっている。

EMC 試験の試験規格は技術の変化に伴い試験方法や測 定周波数範囲などが改定されてきたが、近年ではさらに測 定の不確かさが求められるようになってきた。

日本国内ではEMI測定の自主規制を進めている(一財) VCCI 協会(以下 VCCI: Voluntary Control Council for Interference by Information Technology Equipment)におい て、2019 年 4 月から不確かさの算出を求めるようにな り、賛助会員である KISTEC でも対応が必須となった。

2019 年度の研究報告では EMI 測定うち比較的算出が容 易な電源ポート伝導エミッション測定の不確かさについ て報告したが、2020 年度は、KISTEC において利用率が非 常に高い、30MHz~1GHz における放射エミッション測定 の不確かさについて記載する。なお、報告内容の性質上、 2019 年度の研究報告と共通する箇所があり、記載内容が 重複している部分があるが、ご容赦願いたい。

2. 放射エミッション測定の測定系

放射エミッション測定は、供試機器の筐体から発生する 放射ノイズの測定を目的としており、KISTEC においては 図1の3m 法電波暗室にて実施している。



図1 3m 法電波暗室における放射エミッション測定

放射エミッション測定の測定系を図2に示す。供試機器 からの放射ノイズはアンテナで受信され、整合用の減衰器 を介してプリアンプへ入力される。プリアンプにより増幅 された信号は電波暗室と測定室の間にあるフィルタ盤を 介して受信機へ入力される。測定には計測ソフトを使用す る。



図2 放射エミッション測定の測定系 受信機:ROHDE&SCHWARZ ESU26 プリアンプ:SONOMA 310 バイコニカルアンテナ:Schwarzbeck BBA9106+ハ^{*}ラン VHA9103B ログペリオディックアンテナ:Schwarzbeck VULP9118A 減衰器:HUBER+SUHNER 6dB 計測ソフト:テクノサイエンスジャパン TEPTO

3. 不確かさの要因

放射エミッション測定のバイコニカルアンテナ (30MHz-200MHz) 水平/垂直のバジェットシートを表 1、 2 に、ログペリオディックアンテナ(200MHz-1000MHz) 水 平/垂直のバジェットシートを表 3、4 に示す。入力量 Xi の測定量 V は次のとおりとなる。

$$\begin{split} V = & V_r + a_c + G_P + F_a + \delta V_{SW} + \delta G_P + \delta V_{pa} + \delta V_{pr+} + \delta V_{nf} + \delta M_{aa} + \delta M_{ar} \\ & + \delta F_{af+} \delta F_{ah+} + \delta F_{adir} + \delta F_{aph+} + \delta F_{acp+} + \delta F_{abal} + \delta A_{N} + \delta d + \delta A_{NT} + \delta h \\ & + \delta E_{amb} \end{split}$$



図 3 バイコニカルアンテナ(左)と ログペリオディックアンテナ(右)

不確かさの要因である入力量の推定値 xi について検討 した内容を以下に記載する。なお a)、f)を除き、入力量と 確率分布関数については、VCCI 規定と CISPR16-4-2(CISPR:国際無線障害特別委員会)を引用している。

a) 測定用受信機の読み: Vr は、測定系の不安定さや計測 ソフトの数値の丸め込みに関する入力量である。一般的な 算出方法である平均値の実験標準偏差を求めたが、使用し ている計測ソフトの丸め込み(小数点 2 位以下を四捨五 入)による影響の方が大きいため Vr は±0.05dB と推定し た。確率分布関数は一様(除数√3)となる。

b) アンテナ-受信機 減衰量: ac は、アンテナ-受信機間を 接続する同軸ケーブルで生じる高周波損失に関する入力 量である。損失はネットワークアナライザにより測定して いるため、ネットワークアナライザの校正データからレベ ル測定に関する不確かさを引用して ac を求めた。校正デ ータからの引用であるため、確率分布関数は正規分布(除 数 2) となる。

c) アンプの利得: G_Pはアンテナで受信した信号を増幅す るプリアンプの利得に関する入力量である。利得はネット ワークアナライザにより測定しているため、ネットワーク アナライザの校正データからレベル測定に関する不確か さを引用して G_Pを求めた。校正データからの引用である ため、確率分布関数は正規分布(除数2)となる。

d) アンテナ係数: Faは、受信電圧を電界強度に変換する ためのアンテナ係数に関する入力量であり、校正データか ら引用した。校正データからの引用であるため、確率分布 関数は正規分布(除数2)となる。

e) 正弦波電圧: δVsw は、受信機の正弦波電圧測定に対す る精度の入力量であり、校正データから引用した。校正デ ータからの引用であるため、確率分布関数は正規分布(除 数 2) となる。

f) アンプの不安定さ: δGP は、アンプの電源投入から安定 するまでのエージングの影響に関する入力量である。電源 投入後0分、30分、60分、90分、120分でそれぞれ10回 ずつ利得を測定して、平均値の実験標準偏差を求めたとこ ろ、大きな変動は確認できなかったため、30分後の平均 値の実験標準偏差の最悪値を引用した。平均値の実験標準 偏差からの引用であるため確率分布関数は正規分布(除数 1)となる。

g) パルス振幅応答: δVpa は、受信機のパルス振幅測定に 対する精度の入力量である。校正データから引用すること もできるが、校正時に使用するパルスは、実際の供試機器 から発生する妨害波とは大きく異なるため、引用せず、代 わりに CISPR16-4-2 が定める基準値を引用した。確率分布 関数は一様(除数√3)となる。

h) パルス繰り返し率応答: δVprは、受信機の繰り返しパル スに対する精度の入力量である。g)と同様の理由から CISPR16-4-2 が定める基準値を引用した。確率分布関数は 一様(除数√3)となる。

i) ノイズフロアの影響: δVnf は、受信機のノイズフロアが 測定値に与える影響に関する入力量である。使用している 受信機は CISPR 規格に適合したもので、ノイズフロアは VCCI 規格の限度値に対して 30dB 程度の余裕があるため、 影響は無視できると考えた。 j) アンテナ-アンプ間の不整合: δM_{aa} は、アンテナとアン プの接続箇所の反射の影響に関する入力量である。アンテ ナ(減衰器含む)とアンプ(入力)の反射係数を実測し、 合成して算出した。確率分布関数はU字(除数 $\sqrt{2}$)とな る。

k) アンプ-測定用受信機間の不整合: δM_{ar} は、アンプ・フィルタ盤、測定用受信機の接続箇所の反射の影響に関する 入力量である。アンプ(出力)の反射係数は実測値。フィ ルタ盤の反射係数は一般的な値(1.2)。測定用受信機の反 射係数は校正データから引用し、これらを合成して算出し た。確率分布関数はU字(除数 $\sqrt{2}$)となる。

I) アンテナファクタ周波数補間: δFafは、校正データから 得られるアンテナファクタを周波数補間によって計算す る際に生じる誤差に関する入力量であり、校正データから 算出した。確率分布関数は一様(除数√3)となる。

m) アンテナファクタ高さ変動: δF_{ah} は、アンテナの設置 高さによるアンテナファクタの変動に関する入力量であ り、CISPR16-4-2 が定める基準値を引用した。確率分布関 数は三角(除数 $\sqrt{6}$)となる。

n) 指向性の相違: δF_{adir} は、各周波数におけるアンテナの 指向性と最大受信レベルが得られるアンテナの高さに関 する入力量であり、CISPR16-4-2 が定める基準値を引用し た。確率分布関数は一様(除数 $\sqrt{3}$)となる。

o) 位相中心差:δFaphは、アンテナの基準点から共振する 周波数のアンテナエレメントまでの距離の違いによる影響に関する入力量である。バイコニカルアンテナは、基準 点とエレメントの位置が同じなので入力量は0。ログペリ オディックアンテナは高周波側の短いエレメントと低周 波側の長いエレメントの中央付近に基準点があり、基準点 から各エレメントまでの距離から入力量を算出した。確率 分布関数は一様(除数√3)となる。

p) 交差偏波: δFacp は、アンテナの水平編波と垂直偏波の 識別度に関する入力量である。6 面電波暗室内での測定結 果の最悪値から算出した。確率分布関数は一様(除数√3) となる。

q) 平衡度: δF_{abal} は、アンテナを上下逆にセットして測定 したときの影響に関する入力量である。KISTEC ではアン テナの上下を決めて測定を実施しているので0とした。

 r) サイトの不完全さ: δANは、電波安室内の不要な反射に よる影響に関する入力量である。サイトアッテネーション 測定の最悪値から算出した。確率分布関数は三角(除数√
 6)となる。

s) 離隔距離: δd は、測定距離による影響に関する入力量である。距離を正確に測定できれば無視できるが、 CISPR16-4-2 に準じて±0.1m として算出した値を引用した。確率分布関数は一様(除数√3)となる。

t) 試験テーブル材質の影響: δANT は、発泡スチロール、 FRP、木材などのテーブル材質の反射の影響に関する入力 量である。CISPR16-1-4 では 200MHz 以上の周波数帯域で 評価することが記載されている。当研究所では、発泡スチ ロールのテーブルを使用しており、影響は小さいと考える が、評価用のアンテナを所有していないため、CISPR16-42が定める基準値を引用した。

u) 試験テーブルの高さ: δAh は、試験テーブルの高さの 誤差の影響に関する入力量である。当研究所で使用してい る発泡スチロールのテーブルは、テーブルそのものは規格 で決められた高さ 0.8m だが、材質が柔らかいため重量の 重い EUT を設置した場合、僅かな誤差が考えられるため、 CISPR16-4-2 に準じて±0.01m として算出した値を引用し た。確率分布関数は正規分布(除数 2) となる。

v) OATS 上の外来雑音の影響: δE_{amb} はオープンサイト (OATS) で測定する場合の外来雑音の影響に関する入力 量である。KISTEC では、電波暗室内で測定を行っている ので影響は無視できると考えた。

4. 拡張不確かさの算出

標準不確かさ c_iu(x_i)は、感度係数 c_iを1とし、x_iの不確 かさを除数で除して算出する。次に合成標準不確かさ u_c(y)を次式により算出する。

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_i c_i^2 u^2(x_i)}$$

この合成標準不確かさに、次式のとおり包含係数 k=2 を 乗ずることにより拡張不確かさ Ulab を算出する。

 $U_{lab} = 2u_c(y)$

5. 結果および考察

KISTEC における放射エミッション測定の不確かさを 算出した結果、拡張不確かさ U_{lab} はバイコニカルアンテ ナ水平 3.3dB、垂直 3.9dB、ログペリオディックアンテナ 水平 3.6dB、垂直 5.0dB(U_{lab}は包含係数 k=2 として求め た拡張不確かさで、約 95%の信頼の水準を持つと推定さ れる区間を定める。)となった。CISPR で提示されている 基準値 U_{cispr}は 6.3dB であり、いずれも基準値内に収まっ ている。ログペリオディックアンテナ垂直で若干大きな値 となっているが、これは n)指向性の相違の影響が大きいた めである。高周波帯域のログペリオディックアンテナでは アンテナパターンが一様でない部分の影響が比較的大き く、アンテナが高い位置にあるときは供試機器との角度が 大きくなり、アンテナパターンの正面から離れたところで 供試機器からの放射ノイズを受信するため不確かさの入 力量が大きくなっている。CISPRでは入力量を小さくする 方法として、供試機器の方向へアンテナに傾斜角を付けて 測定する方法が提案されている。また、測定距離が長い 10m法電波暗室では 3m法電波暗室に比べて供試機器との 角度が小さいため入力量は小さくなる。

今のところ VCCI では不確かさの算出を要求してはい るが、測定結果への適用までは要求していない。しかし、 CISPR では、不確かさが基準値より大きい場合は測定値に 不確かさを加えて評価する必要があり、VCCI でも、将来 的には適用する可能性もあることから、不確かさの算出は、 重要な課題と言える。今回、KISTEC における放射エミッ ション測定の不確かさは CISPR の基準値内に収まってい たが、今後は、CISPR 基準値を引用した入力量の再検討や、 測定系の改善など行い KISTEC における不確かさをより 小さくしたいと考える。

【参考文献】

1.VCCI32-1-3:2016 測定装置の不確かさ、(一財) VCCI 協会、(2016)

2.CISPR16-4-2 Edition2.1 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 4-2: Uncertainties, statistics and limit modelling - Measurement instrumentation uncertainty, CISPR, (2014)

3.今井秀孝ほか, *測定における不確かさの表現ガイド* [GUM]ハンドブック,日本規格協会, (2018)

4. 臼井亮, 鶴田誠, *KISTEC における電源ポート伝導エミ* ッション測定の不確かさの評価, *KISTEC*研究報告, (2019)

入力量		x _i の不確かさ			標準不確かさ
	X _i	d	В	確率分布関数	c _i u(x _i) dB
a)測定用受信機の読み	Vr	±	0.05	一様	0.03
b)アンテナ-受信機 減衰量	a _c	Ŧ	0.28	K=2	0.14
c)アンプの利得	Gp	±	0.28	K=2	0.14
d)アンテナ係数	Fa	±	0.62	K=2	0.31
 ・受信機補正値: 					
e)正弦波電圧	δV_{SW}	±	0.25	K=2	0.13
f)アンプの不安定さ	δG_{P}	±	0.002	K=1	0.002
g)パルス振幅応答	δV_{pa}	±	1.5	一様	0.87
h)パルス繰り返し率応答	δV_{pr}	±	1.5	一様	0.87
i)ノイズフロアの影響	δV_{nf}	±	0		
j)不整合:アンテナ-アンプ	δM_{aa}	0.43	-0.45	U字	0.31
k)不整合:アンプ-測定用受信機	δM_{ar}	0.17	-0.17	U字	0.12
・バイコニカルアンテナ補正					
I)アンテナファクタ周波数補間	δF_{af}	±	0.2	一様	0.12
m)アンテナファクタ高さ変動	δF_{ah}	±	1	一様	0.58
n)指向性の相違	δF_{adir}	±	0		
o)位相中心位置	δF_{aph}	±	0		
p)交差偏波	δF_{acp}	0.79	-0.87	一様	0.48
q)平衡度	δF_{abal}	±	0		
・サイト補正					
r)サイトの不完全さ	δA_{N}	2.25	-0.87	三角	0.64
s)離隔距離	δd	±	0.3	一様	0.17
t)試験テーブル材質の影響	δA_{NT}	±	0		
u)試験テーブルの高さ	δh	±	0.1	K=2	0.05
v)OATS上の外来雑音の影響	δEamb	±	0		

表1 放射エミッション測定, バイコニカルアンテナ(30MHz-200MHz) 水平のバジェットシート

合成標準不確かさ 1.7dB 拡張不確かさ 3.3dB(Ucispr=6.3)

入力量			x iの不得	標準不確かさ	
	X _i		dB	確率分布関数	ciu(xi) dB
a)測定用受信機の読み	Vr	±	0.05	一様	0.03
b)アンテナ-受信機 減衰量	a _c	±	0.28	K=2	0.14
c)アンプの利得	Gp	±	0.28	K=2	0.14
d)アンテナ係数	Fa	±	0.62	K=2	0.31
・受信機補正値:					
e)正弦波電圧	δV_{SW}	±	0.25	K=2	0.13
f)アンプの不安定さ	$\delta G_{\!P}$	±	0.002	K=1	0.002
g)パルス振幅応答	δV_{pa}	±	1.5	一様	0.87
h)パルス繰り返し率応答	δV_{pr}	±	1.5	一様	0.87
i)ノイズフロアの影響	δV_{nf}		0		

表2 放射エミッション測定, バイコニカルアンテナ(30MHz-200MHz) 垂直のバジェットシート

e)正弦波電圧	δV_{SW}	±	0.25	K=2	0.13
f)アンプの不安定さ	$\delta G_{\!P}$	±	0.002	K=1	0.002
g)パルス振幅応答	δV_{pa}	±	1.5	一様	0.87
h)パルス繰り返し率応答	δV_{pr}	±	1.5	一様	0.87
i)ノイズフロアの影響	δV_{nf}		0		
j)不整合:アンテナ-アンプ	δM_{aa}	0.43	-0.45	U字	0.31
k)不整合:アンプ-測定用受信機	δM_{ar}	0.17	-0.17	U字	0.12
・バイコニカルアンテナ補正					
I)アンテナファクタ周波数補間	$\delta F_{a\!f}$	±	0.2	一様	0.12
m)アンテナファクタ高さ変動	δF_{ah}	±			
n)指向性の相違 距離3m,<130MH	δF_{adir}	±	0.5	一様	0.29
距離3m,>130MHz	δF_{adir}	±	1	一様	0.58
o)位相中心位置	δF_{aph}	±	0		
p)交差偏波	δF_{acp}	0.79	-0.87	一様	0.48
q)平衡度	δF_{abal}	±	0	一様	0.00
・サイト補正					
r)サイトの不完全さ	$\delta A_{N} \\$	3.39	-2.26	三角	1.15
s)離隔距離	δd	±	0.3	一様	0.17
t)試験テーブル材質の影響	δA_{NT}	±	0		
u)試験テーブルの高さ	δh	±	0.1	K=2	0.05
v)OATS上の外来雑音の影響	δE_{amb}	±	0		
 合成標準不確かさ 2.0dB					

拡張不確かさ 3.9dB(Ucispr=6.3)

入力量		x iの不確かさ			標準不確かさ
	X _i	d	В	確率分布関数	c _i u(x _i) dB
a)測定用受信機の読み	Vr	±	0.05	一様	0.03
b)アンテナ-受信機 減衰量	a _c	±	0.28	K=2	0.14
c)アンプの利得	Gp	±	0.28	K=2	0.14
d)アンテナ係数	Fa	±	0.62	K=2	0.31
 ・受信機補正値: 					
e)正弦波電圧	δV_{SW}	±	0.25	K=2	0.13
f)アンプの不安定さ	$\delta G_{\!P}$	±	0.002	K=1	0.002
g)パルス振幅応答	δV_{pa}	±	1.5	一様	0.87
h)パルス繰り返し率応答	δV_{pr}	±	1.5	一様	0.87
i)ノイズフロアの影響	δV_{nf}	±	0		
j)不整合:アンテナ-アンプ	δM_{aa}	0.29	-0.31	U字	0.21
k)不整合:アンプ-測定用受信機	δM_{ar}	0.25	-0.26	U字	0.18
・ログペリアンテナ補正					
I)アンテナファクタ周波数補間	$\delta F_{a\!f}$	±	0.18	一様	0.10
m)アンテナファクタ高さ変動	δF_{ah}	±	0.3	一様	0.17
n)指向性の相違	δF_{adir}	±	1	一様	0.58
o)位相中心位置	δF_{aph}	0.91	-0.92	一様	0.53
p)交差偏波	δF_{acp}	1.08	-1.24	一様	0.67
q)平衡度	δF_{abal}	±	0		
・サイト補正					
r)サイトの不完全さ	δA_{N}	1.81	-0.78	三角	0.53
s)離隔距離	δd	±	0.3	一様	0.17
t)試験テーブル材質の影響	δA_{NT}	±	0.5	一様	0.29
u)試験テーブルの高さ	δh	±	0.1	K=2	0.05
v)OATS上の外来雑音の影響	δE_{amb}	±	0		

表3 放射エミッション測定, ログペリオディックアンテナ(200MHz-1000MHz) 水平のバジェットシート

合成標準不確かさ 1.8dB 拡張不確かさ 3.6dB (Ucispr=6.3)

表 4	放射エミッション測定,	ログペリオディックアンテナ	(200MHz-1000MHz)	垂直のバジェットシ	·— ۲
-----	-------------	---------------	------------------	-----------	------

入力量			x _i の不	標準不確かさ	
	X _i	d	IB	確率分布関数	c _i u(x _i) dB
a)測定用受信機の読み	Vr	±	0.05	一様	0.03
b)アンテナ-受信機 減衰量	a _c	±	0.28	K=2	0.14
c)アンプの利得	G _P	±	0.28	K=2	0.14
d)アンテナ係数	Fa	±	0.62	K=2	0.31
 ・受信機補正値: 					
e)正弦波電圧	δV_{SW}	±	0.25	K=2	0.13
f)アンプの不安定さ	δG_{P}	±	0.002	K=1	0.002
g)パルス振幅応答	δV_{pa}	±	1.5	一様	0.87
h)パルス繰り返し率応答	δV_{pr}	±	1.5	一様	0.87
i)ノイズフロアの影響	δV_{nf}	±	0		
j)不整合:アンテナ-アンプ	δM_{aa}	0.29	-0.31	U字	0.21
k)不整合:アンプ-測定用受信機	δM_{ar}	0.25	-0.26	U字	0.18
・ログペリアンテナ補正					
I)アンテナファクタ周波数補間	$\delta F_{a\!f}$	±	0.18	一様	0.10
m)アンテナファクタ高さ変動	δF_{ah}	±	0.1	一様	0.06
n)指向性の相違	δF_{adir}	±	3.2	一様	1.85
o)位相中心位置	δF_{aph}	0.91	-0.92	一様	0.53
p)交差偏波	δF_{acp}	1.08	-1.24	一様	0.67
q)平衡度	δF_{abal}	±	0		
・サイト補正					
r)サイトの不完全さ	δA_{N}	1.67	-1.23	三角	0.59
s)離隔距離	δd	±	0.3	一様	0.17
t)試験テーブル材質の影響	δA_{NT}	±	0.5	一様	0.29
u)試験テーブルの高さ	δh	±	0.1	K=2	0.05
v)OATS上の外来雑音の影響	δE_{amb}	±	0		

合成標準不確かさ 2.5dB

拡張不確かさ 5.0dB (Ucispr=6.3)