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。

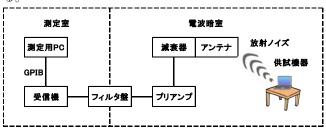


図2 放射エミッション測定の測定系

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+パラン 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 X_i の測定量 V は次のとおりとなる。

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

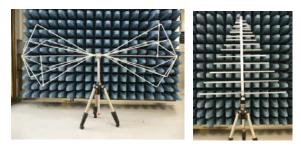


図3 バイコニカルアンテナ(左)とログペリオディックアンテナ(右)

不確かさの要因である入力量の推定値 x_i 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: V_r 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 V_r は $\pm 0.05 dB$ と推定した。確率分布関数は一様(除数 $\sqrt{3}$)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: F_a 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: δV_{sw} 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: 8GP 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: δV_{pa} 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 $\sqrt{3}$)となる。
- h) パルス繰り返し率応答: δV_{pr} 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 $\sqrt{3}$)となる。
- i) ノイズフロアの影響: δV_{nf} 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: δ Faf 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 $\sqrt{3}$)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: δF_{aph} 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 $\sqrt{3}$)となる。
- p) 交差偏波: δF_{acp} 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 $\sqrt{3}$) 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: δA_N 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 \sqrt 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 $\pm 0.1 m$ として算出した値を引用した。確率分布関数は一様(除数 $\sqrt{3}$)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、CISPR16-4-

2が定める基準値を引用した。

u) 試験テーブルの高さ: δ Ah 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 $\pm 0.01m$ 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 U_{lab} 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-I-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)

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

入力量			xiの不	標準不確かさ	
	X_{i}	dB		確率分布関数	c _i u(x _i) dB
a)測定用受信機の読み	V _r	±	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	$\delta G_{\!P}$	±	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	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	δE_{amb}	±	0		

合成標準不確かさ 1.7dB

拡張不確かさ 3.3dB (Ucispr=6.3)

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

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	V _r	±	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	F_a	±	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	$\delta V_{nf} \\$		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					
l)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}	±			
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}	\pm	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		
			~ 战 煙 淮		

合成標準不確かさ 2.0dB

拡張不確かさ 3.9dB (Ucispr=6.3)

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

入力量			xiの不	標準不確かさ	
	X_{i}	dB		確率分布関数	c _i u(x _i) dB
a)測定用受信機の読み	V_{r}	H	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	F_a	±	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	δF_{af}	±	0.18	一様	0.10
m)アンテナファクタ高さ変動	$\delta F_{ah} \\$	±	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	$\delta A_{N} \\$	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		

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ート

入力量		xiの不確かさ			標準不確かさ
	X_{i}	dB		確率分布関数	c _i u(x _i) dB
a)測定用受信機の読み	V_{r}	±	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	$\delta G_{\!P}$	±	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	δF_{af}	±	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	$\delta A_{N} \\$	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	$\delta A_{NT} \\$	±	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)