

軍需機器の EMC — MIL-STD-461G の概要

Part 1: 主なエミッション要求 (CE101, CE102, RE101, RE102)

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2020 年 8 月 11 日

目 次

1 共通事項	2
1.1 要求の調整	2
1.2 許容差	2
1.3 シールド・エンクロージャ	3
1.4 グランド・プレーン	3
1.5 LISN	3
1.6 EUT の設置と動作	3
1.6.1 EUT の設置	3
1.6.2 ケーブルとその引き回し	6
1.6.3 EUT の動作	7
1.7 レシーバ	7
1.8 試験システムの確認	7
1.9 アンビエント	7
1.10 オーバーロードへの配慮	7
1.11 データの提示	8
2 CE101 (伝導エミッション、音声周波電流、電源線)	8
2.1 インテグリティ・チェック	8
2.2 測定	9
2.3 限度	9
2.4 データの提示	9
3 CE102 (伝導エミッション、無線周波電圧、電源線)	9
3.1 インテグリティ・チェック	9
3.2 測定	11
3.3 限度	11
3.4 データの提示	11
3.5 LISN の補正係数	11
4 RE101 (放射エミッション、磁界)	11
4.1 インテグリティ・チェック	11
4.2 測定	12
4.3 限度	13
4.4 データの提示	13
5 RE102 (放射エミッション、電界)	13
5.1 インテグリティ・チェック	14
5.2 測定	14
5.3 限度	17
5.4 データの提示	17
6 参考: 車載機器のエミッション限度との比較	17
7 参考資料	17

MIL-STD-461 は軍需関連のサブシステムや機器の EMC 評価に関する要求を定める規格として米国国防総省 (DoD) が発行しているもので、主に軍関係機関への納入に際しての基準の 1 つとして用いられている。

この規格は、独立して、あるいは他のサブシステムやシステムの一部として用いられるサブシステムや機器への適用が意図されたもので、機器ラックよりも大きくないエンクロージャ、エンクロージャ間の個別の配線である電氣的相互接続、また主電源からの電源入力を持つアイテムに最も良く適している。この規格はエンクロージャに組み込まれるモジュールのようなアイテムに直接適用すべきではない。また、この規格は車両、船舶、航空機、その他のプラットフォームそのものやシステム全体への適用も意図されていない。

本稿の執筆の時点でのこの規格の最新版は 2015 年に発行された MIL-STD-461G^[1] で、これには **表 1** に示すような試験項目が含まれている。実際の評価で適用する試験項目や限度などは調達機関からの指定などがあればそれに従うことになるだろうが、基本的には機器の使用環境など (陸軍、海軍、空軍のいずれの管轄の、どのようなプラットフォームでの使用が意図されているか) や機器の性質から判断することができる (**表 2**)。

本稿では、MIL-STD-461G のこれらの試験法のうち、**表 1** で太字で示した試験法について、その概要を述べる。なお、本稿は規格の内容全てをカバーするものではなく、また正確であるとも限らないので、正確な情報は規格そのもの^[1] や関連する公式な文書を参照されたい。

CE101	伝導エミッション、音声周波電流、電源線	30 Hz～10 kHz
CE102	伝導エミッション、無線周波電圧、電源線	10 kHz～10 MHz
CE106	伝導エミッション、アンテナ・ポート	10 kHz～40 GHz
CS101	伝導サセプティビリティ、電源線	30 Hz～150 kHz
CS103	伝導サセプティビリティ、アンテナ・ポート、相互変調	15 Hz～10 GHz
CS104	伝導サセプティビリティ、アンテナ・ポート、不要信号の排除	30 Hz～20 GHz
CS105	伝導サセプティビリティ、アンテナ・ポート、混変調	30 Hz～20 GHz
CS109	伝導サセプティビリティ、構造電流	60 Hz～100 kHz
CS114	伝導サセプティビリティ、バルク・ケーブル注入	10 kHz～200 MHz
CS115	伝導サセプティビリティ、バルク・ケーブル注入、インパルス励起	
CS116	伝導サセプティビリティ、減衰正弦波トランジェント、ケーブル及び電源リード	
CS117	伝導サセプティビリティ、雷誘導トランジェント、ケーブル及び電源リード	
CS118	伝導サセプティビリティ、人体静電気放電	
RE101	放射エミッション、磁界	30 Hz～100 kHz
RE102	放射エミッション、電界	10 kHz～18 GHz
RE103	放射エミッション、アンテナ、スプリアス及び高調波出力	10 kHz～40 GHz
RS101	放射サセプティビリティ、磁界	30 Hz～100 kHz
RS103	放射サセプティビリティ、電界	2 MHz～40 GHz
RS105	放射サセプティビリティ、過渡電磁界	

表 1: 試験法の一覧

以下のプラットフォームや設備に設置される、あるいはそれらから発射される機器やサブシステム	CE101	CE102	CE106	CS101	CS103	CS104	CS105	CS109	CS114	CS115	CS116	CS117	CS118	RE101	RE102	RE103	RS101	RS103	RS105
水上船	A	A	L	A	S	L	S	L	A	S	A	L	S	A	A	L	L	A	L
潜水艦	A	A	L	A	S	L	S	L	A	S	L	S	S	A	A	L	L	A	L
駐機整備区域を含む、航空機 (陸軍)	A	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	L	A	A	A	L	A	A	L
航空機 (海軍)	L	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	L	A	L	A	L	L	A	L
航空機 (空軍)	-	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	L	A	-	A	L	-	A	-
打ち上げ機を含む、宇宙システム	-	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	L	-	-	A	L	-	A	-
地上 (陸軍)	-	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	S	A	-	A	L	L	A	-
地上 (海軍)	-	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	S	A	-	A	L	L	A	L
地上 (空軍)	-	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	-	A	-	A	L	-	A	-

A: 適用, L: 規格のそれぞれの章での規定に従う, S: 調達機関が調達文書で規定

表 2: 各試験の適用

1 共通事項

1.1 要求の調整

この規格は一般的な試験方法を定めるが、技術的な分析などに基づいて、その適用が適当でない、あるいは要求を調整すべきと考えられることがあるかも知れない。

そのような場合、その特定の場合に適用する要求があらかじめ調達文書などで指定されている場合を除き、適用する要求を事前に文書化して調達機関の承認を得ることが必要となるだろう。

1.2 許容差

特に規定されない場合、以下の許容差が適用される:

長さ:	±5 %
周波数:	±2 %
振幅 (レシーバ):	±2 dB
振幅 (測定系):	±3 dB
時間:	±5 %
抵抗:	±5 %
静電容量:	±20 %

1.3 シールド・エンクロージャ

多くの試験は、エミッション試験では放送などの外部からの電磁界が試験に悪影響を与えないように、サセプティビリティ試験（イミュニティ試験）では試験で発生させられる妨害が周囲に悪影響を与えないように、適切な遮蔽を与えるシールド・エンクロージャ（シールド・ルーム）内で行なうことが必要となる。

通常、このようなシールド・エンクロージャへの電源の引き込みは、ケーブルを介しての妨害の侵入や漏洩を防ぐため、必要な周波数範囲で十分な減衰を与える貫通フィルタを通して行なわれる。

周辺機器などを EUT が置かれるシールド・エンクロージャの外に置く場合、ケーブルを介しての妨害の侵入や漏洩を低減するため、周辺機器を置く場所もシールド・エンクロージャとする、電源と同様にシールド・エンクロージャを出る箇所適切なフィルタに通す、などの対応が必要となるだろう。

電界放射エミッション測定や放射サセプティビリティ試験では、エンクロージャ内での反射の試験への影響を抑えるため、単なるシールド・エンクロージャではなく、80～250 MHz で 6 dB 以上、250 MHz 以上で 10 dB 以上の吸収率の電波吸収体を壁と天井に取り付けた電波暗室を用いる。

この電波吸収体は、少なくとも、試験セットアップの背面とアンテナの背面の壁、またセットアップの 50 cm 以上手前までの側面の壁と天井を覆い、セットアップやアンテナから 30 cm 以上離れるようにする（図 1）。

試験時、電波暗室内には、他の帯域の試験のためのアンテナを含めて、その試験に必要なもの以外を置いてはならない。

1.4 グランド・プレーン

実際の設置で金属面に設置されることがある、あるいは取り付け状況が不明な機器の試験では、テーブル上に金属のグランド・プレーンが必要となる（図 5）。

この金属のグランド・プレーンは以下の条件を満たすようにする：

- 短辺 76 cm 以上、面積 2.25 m² 以上、表面抵抗率 0.1 mΩ/□ 以下のものとする；

- 少なくとも 1 m 毎に、長さ：幅が 5:1 以下の金属のストラップでシールド・エンクロージャに接続する；
- グランド・プレーンとシールド・エンクロージャのあいだの抵抗は 2.5 mΩ 以下となるようにする。

実際の設置で導電性の複合材^{†1}上に設置される機器の試験では金属のグランド・プレーンの代わりに典型的な表面抵抗率のグランド・プレーンを用いる。

1.5 LISN

AC と DC のいずれの電源も、電源インピーダンスの安定化のために 50 μH + 5 Ω / 50 Ω LISN^{†2}（図 3）を介して給電する。

特定の状況では 5 μH / 50 Ω LISN の使用が許容されるかも知れないが、調達機関の承認が必要である。^{†3}

LISN のインピーダンスは信号出力ポートを 50 Ω で終端して電源入力ポートを開放とした状態で 10 kHz～10 MHz の周波数範囲について規定され、基準値の ±20 % の範囲になければならない（図 4）。

LISN のインピーダンスのプロットは試験報告書にも記載する。

1.6 EUT の設置と動作

1.6.1 EUT の設置

EUT は実際の使用時の設置の方法に応じて以下のように設置して試験する：

- 実際の設置で金属面に設置される場合や取り付け状況が不明な場合、高さ 80～90 cm の非導電性のテーブルの上のグランド・プレーン（§1.4）の上に（図 5）；
- 実際の設置で導電性の複合材^{†1}上に設置される場合、前項と同様に、だが金属のグランド・プレーンの代わりに典型的な表面抵抗率のグランド・プレーンの上に；

^{†1} CFRP（炭素繊維強化プラスチック）のような。

^{†2} LISN = line impedance stabilization network

^{†3} 例えば電源が 400 Hz 100 A の場合、50 μH のインダクタのリアクタンスは約 0.13 Ω となり、これは 100 A では約 13 V の電圧降下を生じるため、50 μH + 5 Ω / 50 Ω LISN の使用は難しそうである。

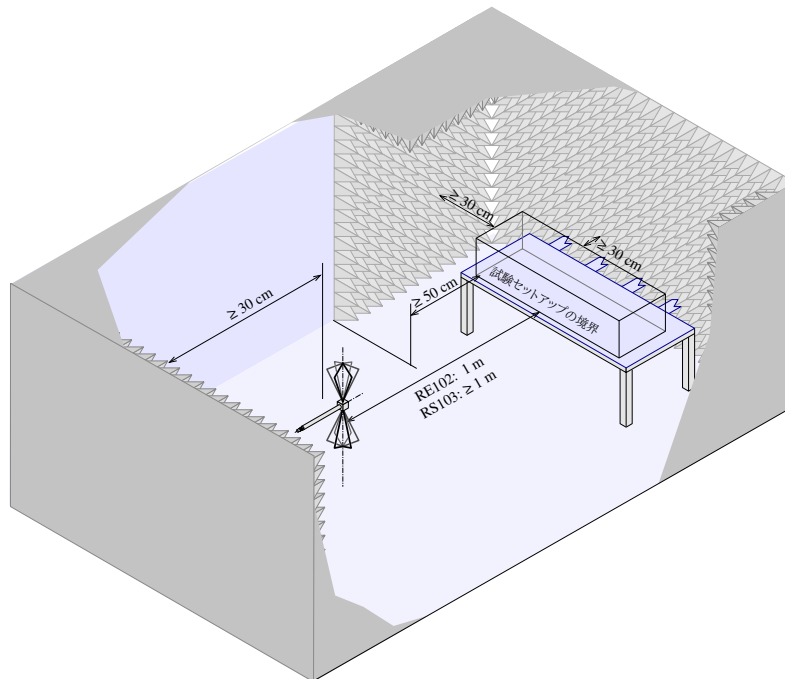
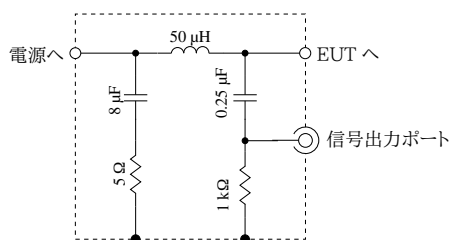


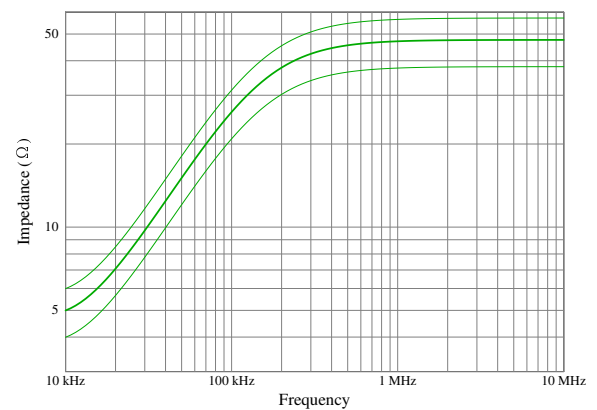
図 1: 電波暗室の概観



図 2: 実際の電波暗室の例

図 3: LISN (50 μ H + 5 Ω / 50 Ω) の回路

- 実際の設置で導電性の面が存在しない場合、高さ 80～90 cm の非導電性のテーブルの上に (図 6);
- 自立型の場合、床面のグラウンド・プレーンの上に (図 7)。

図 4: LISN (50 μ H + 5 Ω / 50 Ω) のインピーダンス

機器の筐体と取付台のあいだの、またグラウンド・プレーンへの接続には設計に含まれている手段のみを用いる。この接続は設置図や機器の仕様に従って確認し、確認の手順と結果は試験報告書に記載する。

実際の設置で防振架台が用いられるならば EUT はそれに取り付けた状態で設置する。

RE102 や RS103 などの放射での試験では、EUT は最もエミッションが高くなる、あるいは放射妨害の影響を最も良く受ける面をアンテナに向ける。^{†4}

^{†4} アンテナに向ける面の決定のために予備試験を行なうか、あるいはそれぞれの面をアンテナに向けての試験を行なうことが必要となるかも知れない。

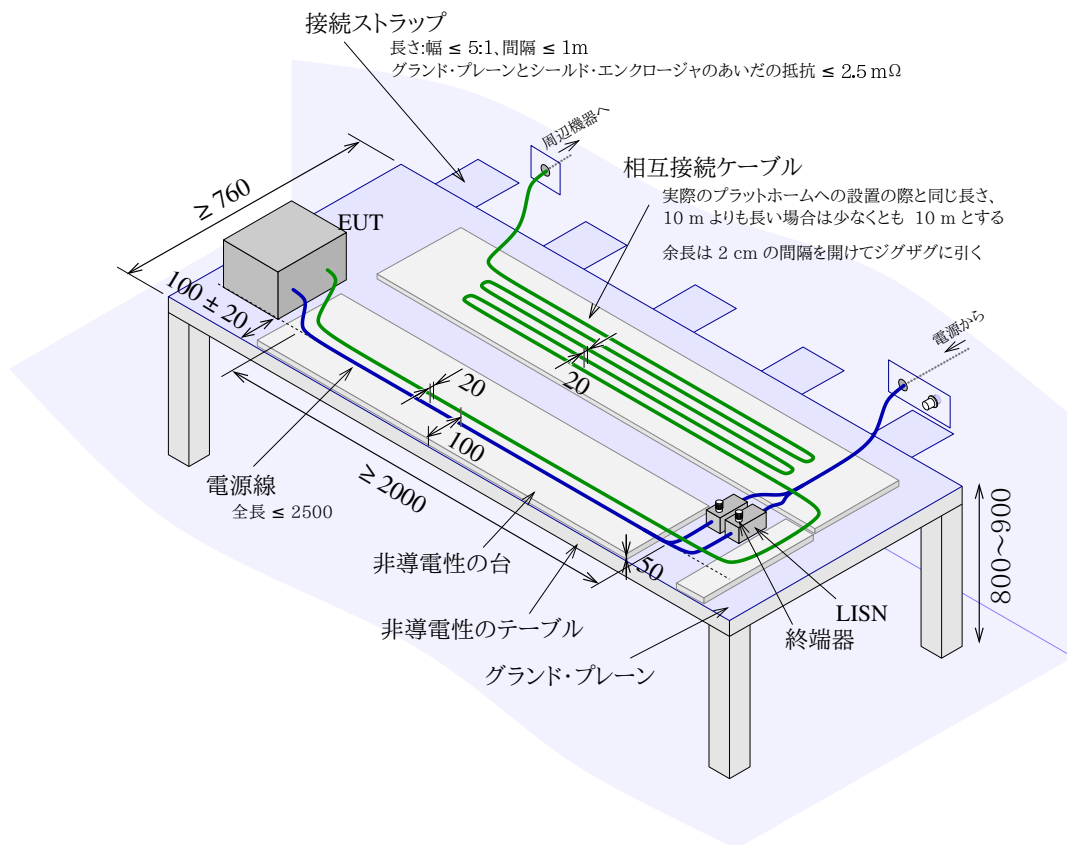


図 5: 基本的なセットアップ (グラウンド・プレーンあり)

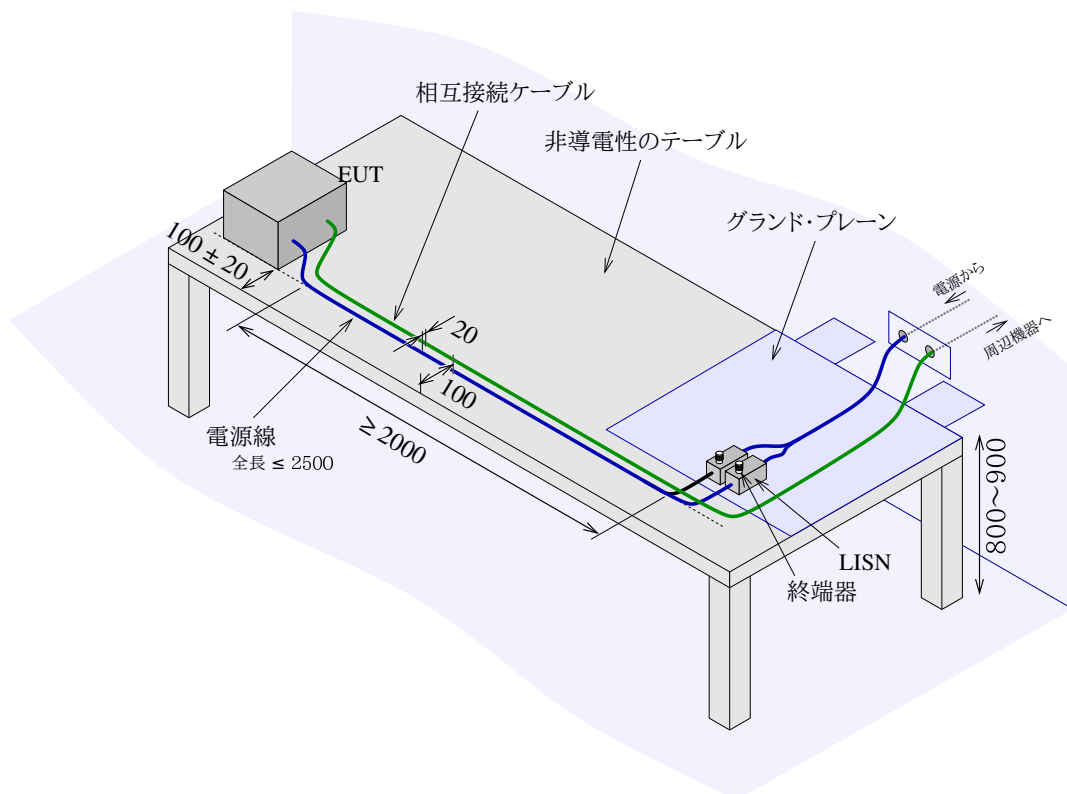


図 6: 基本的なセットアップ (グラウンド・プレーンなし)

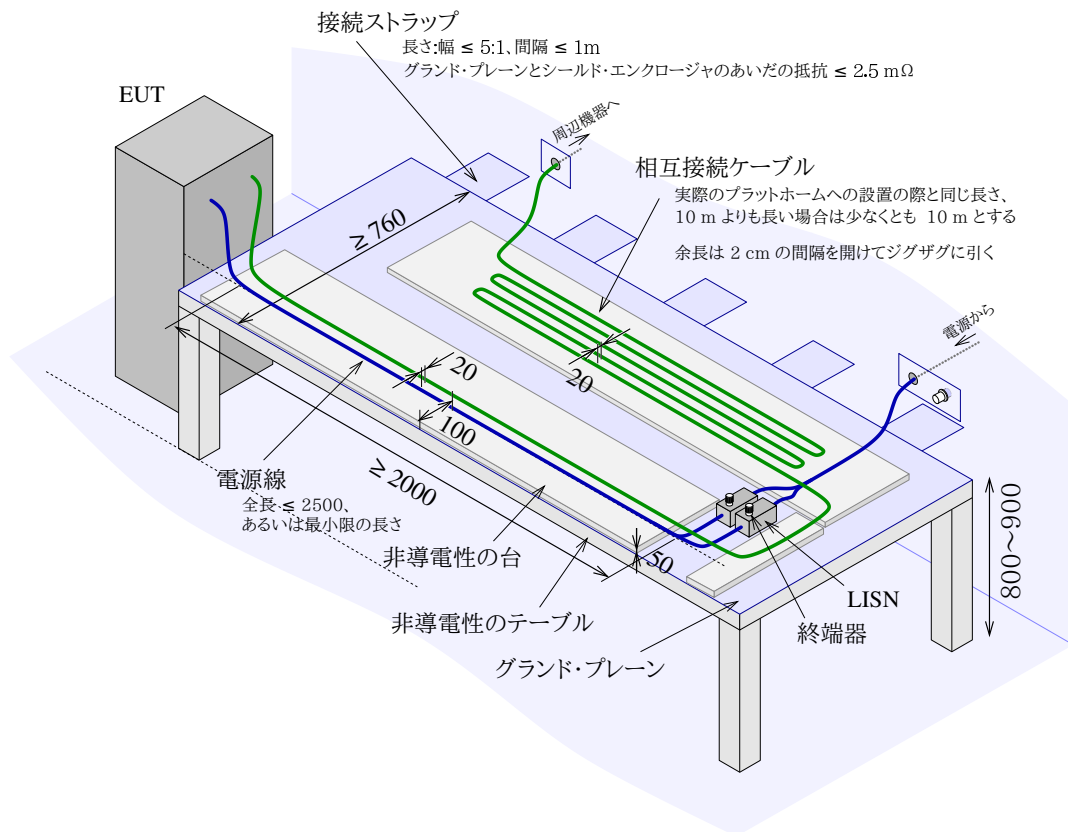


図 7: 自立型機器の基本的なセットアップ

1.6.2 ケーブルとその引き回し

リードは実際の設置の際と同様にケーブル（ハーネス）としてまとめる。ケーブルは実際の設置を代表するものでなければならず、シールド線は設置要求でそのように指定されている場合にのみ使用できる。電源入力線はシールドされていない。ケーブルやリードは、構造、例えば対撚り、シールド、シールドの終端などが正しいことを設置要求に対して確認する。

相互接続ケーブルは実際のプラットホームへの設置の際と同じ長さとし、それが 10 m よりも長い場合は少なくとも 10 m、ケーブル長が規定されていない場合は所定の方法で配置できる長さとする。

電源線や相互接続ケーブルは、少なくとも 2 m をテーブルの前縁と平行に、またグラウンド・プレーンがある場合はその面から 5 cm の高さに引く。この区間でのケーブル（ハーネス）の外表面間の距離は 2 cm とし、グラウンド・プレーンがある場合は最も手前のケーブルはグラウンド・プレーンの前縁から 10 cm の距離に平行に引く（図 5）。

ケーブルが高い位置から出ている場合や自立型機

器の場合、ケーブルをテーブルの上の高さまで引き下ろすか引き上げて上記のように引く（図 7）。

電源入力線は、中性線や帰路導体を含めて、ケーブルの前縁と平行に 2 m 引いた後、最短で LISN (§1.5) に接続する。

電源導体が相互接続ケーブル（シールド・ケーブルであっても）の一部となっている場合、電源導体は他のリードから分けて LISN まで引く。

EUT と LISN のあいだの電源線はできる限り短くし、大型の EUT でそれよりも長いものが必要となる場合を除いて 2.5 m 以下とする。背の高い機器の上端近くや自立型機器の床面近くから電源線が出ている場合、テーブルの上の高さまで引き下ろすか引き上げるだけで 0.5 m 以上必要となるかも知れず、テーブルの上に 2 m 引くためには 2.5 m 以上の長さが必要となりそうであるが、このような場合は所定の方法で引き回すために必要な最小限の長さとする。

相互接続ケーブルの余長はセットアップの後ろ側に互いに 2 cm の間隔を開けてジグザグに引く（図 5）。

1.6.3 EUT の動作

エミッション測定では最大のエミッションを発生する動作モードで、サセプティビリティ試験では最も敏感な動作モードで動作させる。複数の動作モードがある場合、全ての回路を評価できるだけの数のモードで試験する。モードの選択の根拠は文書化する。

無線受信機のような同調可能な RF 機器は、それぞれの同調周波数帯について周波数帯の中程、及び周波数帯かチャンネルの範囲の端から $\pm 5\%$ 以内の周波数の少なくとも 3 つの周波数に同調させて試験する。

1.7 レシーバ

エミッションの測定には下記の条件を満たすテスト・レシーバやスペクトラム・アナライザを使用する:

- 帯域幅: 表 3 の値以上^{†5}
- 検波器: 尖頭値
- 振幅の許容差 ± 2 dB

同調型のレシーバやスペクトラム・アナライザでの周波数掃引は、連続的に、あるいはステップで行ない、ステップ掃引の場合の掃引ステップは帯域幅の $1/2$ 以下とする。最小のドウェル・タイムや掃引率は表 3 に示したが、エミッションが間欠的に発生する、あるいは顕著な変動があるような場合、その動作に応じてドウェル・タイムを長くする、あるいは掃引率を下げる必要があるかも知れない。^{†6}

^{†5} CISPR 16-1-1 では 9 kHz 以下についての規定はなく、また 6 dB 帯域幅は 200 Hz (9 kHz~150 kHz)、9 kHz (150 kHz~30 MHz)、120 kHz (30 MHz~1000 MHz)、1 MHz (1 GHz~) となっているので、CISPR 16-1-1 に適合したレシーバがこの測定に適しているとは限らない。レシーバによっては表 3 で示した通りの 6 dB 帯域幅も選択できることもある。また、スペクトラム・アナライザは典型的には 3 dB 帯域幅を 1, 3, 5 ステップで設定でき、6 dB 帯域幅は 3 dB 帯域幅よりも大きくなるので、例えば 3 dB 帯域幅 10 kHz を 6 dB 帯域幅 10 kHz の代わりに使用することもできる。帯域幅が広い場合、広帯域のエミッションは高く測定されるが、MIL-STD-461G では帯域幅による換算は行なえない。

^{†6} 10 kHz~18 GHz の範囲をステップで掃引すると最小で約 60000 ステップ近くとなる。ドウェル・タイムを 0.015 秒とすれば掃引時間は 15 分程度 (勿論、実際の測定時間はこれよりも長くなる) で済む計算となるが、例えばエミッションが間欠的に発生することからドウェル・タイムを 3 秒とする必要があるれば 1 回の掃引に約 50 時間を要することになる。従って、特に同調型のレシーバやスペクトラム・アナライザを用いる場合、EUT の動作条件の選択が、またドウェル・タイムの決定が非常に重要なものとなり得る。

同調型のレシーバやスペクトラム・アナライザで周波数掃引を行なう代わりに FFT (タイム・ドメイン) による分析を用いることもでき、この場合、レシーバは ANSI C63.2 (CISPR 16-1-1) の要求に適合していることが必要となる。

1.8 試験システムの確認

これらの試験に関しては試験前に行なうべき試験システムの確認 (インテグリティ・チェック) の方法も規定されており、この規格への全面的な適合のためには試験システムの確認を規定された方法に従って行なうことも必要となる。

1.9 アンビエント

エミッション試験に先立って、EUT の電源を切り、全ての周辺機器の電源を入れた状態で測定されたアンビエントは、その試験で適用される限度よりも 6 dB 以上低くなければならない。

電源線の伝導でのアンビエントは電源線から EUT を切り離して EUT と同等の電流が流れる抵抗負荷を接続して測定する。

アンビエントの測定結果には例えば次のような要因が影響することがある:

- 測定系のノイズ・フロア;^{†7}
- 放送や無線通信などの外部からの電磁界;
- 電源装置や周辺機器が発生するノイズ;
- 交流電源波形の歪みや直流電源電圧のリップル。^{†8}

1.10 オーバーロードへの配慮

EUT の電源のオン/オフや動作の開始/終了などの際に発生するかも知れない過渡的なノイズを含めて、過大なレベルのノイズはレシーバやその他の機器を損傷させることもあるため、試験中に起こりえ

^{†7} ノイズ・フロアは計測器自身が発生するノイズが観測されているもので、アンビエント・ノイズ (周囲雑音) ではないが、同様に測定に影響する。

^{†8} 特に CE101 (§2) では電源電圧波形歪みやリップルに伴う電源電流波形の歪みが低い周波数のアンビエントに顕著に寄与する可能性がある。これは電源電流に応じて増加することが予期されるので、そのアンビエントの確認は試験の際と同等の電流を流した状態で行なうことが重要となる。

周波数範囲	6 dB 帯域幅	最小ドウェル・タイム (s)		最小測定時間 連続掃引
		ステップ同調	FFT	
30 Hz～1 kHz	10 Hz	0.15	1	0.015 s/Hz
1 kHz～10 kHz	100 Hz	0.015	1	0.15 s/kHz
10 kHz～150 kHz	1 kHz	0.015	1	0.015 s/kHz
150 kHz～10 MHz	10 kHz	0.015	1	1.5 s/MHz
10 MHz～30 MHz	10 kHz	0.015	0.15	1.5 s/MHz
30 MHz～1 GHz	100 kHz	0.015	0.15	0.15 s/MHz
1 GHz～	1 MHz	0.015	0.015	15 s/GHz

表 3: レシーバ (スペクトラム・アナライザ) の帯域幅と測定時間

る過大なノイズに対する保護を考えることも必要となるかも知れない。

過渡的なノイズに対する保護のためには、しばしばパルス・リミッタ (トランジェント・サプレッサ) が用いられる。

損傷を引き起こさないレベルであっても、レシーバ、プリアンプ、またアクティブ・アンテナはオーバーロードし、誤った測定結果をもたらすことがある。また、測定系にパルス・リミッタが入っている場合、信号レベルが高い時にパルス・リミッタの影響が現われ、同様に誤った結果をもたらすことがある。

従って、エミッション測定ではオーバーロードの影響に常に注意を払うことが必要となるだろう。

オーバーロードが測定結果に影響していないかどうかは、例えば測定系の最も入力側 (アクティブ・アンテナの場合は内蔵のアンプの入力側) に 10 dB 程度のアッテネータを入れることで確認できる。この時、スペクトラムがアッテネータの減衰の分だけ下がる、あるいはアッテネータの減衰量を補正した後のスペクトラムが有意に変化しないならば、測定結果に有意に影響するようなオーバーロードは生じていないとみなすことができる。

1.11 データの提示

周波数に対するエミッションの大きさのデータは、連続的かつ自動的に生成されたものとする。この情報は補正係数を反映したものとし、該当する限度も含める。データのプロットは、周波数分解能は少なくとも 1 % かレシーバの帯域幅の 2 倍、振幅分解能は少なくとも 1 dB とする。

2 CE101 (伝導エミッション、音声周波電流、電源線)

CE101 は 電源リード (帰路導体を含む) 上の 30 Hz～10 kHz (AC 電源の場合は電源周波数の 2 倍以上の周波数) のエミッション^{†9}を電流プローブを用いて測定するもので、

- 水上船
- 潜水艦
- 駐機整備区域を含む、航空機 (陸軍)
- ソナーや磁気探知機などの 30 Hz～10 kHz で動作する対潜戦 (ASW) 機器を搭載した航空機 (海軍)

で使用される、外部から AC や DC の電源の供給を受ける機器に適用される。

2.1 インテグリティ・チェック

測定前の測定系の確認は、1.1 kHz、3 kHz、及び 9.9 kHz のそれぞれについて、以下のように行なう:

1. 図 8 のような接続で、限度の -6 dB 以下の振幅の信号を電流プローブに通す;
2. オシロスコープと負荷抵抗 R で電流のレベルを確認し、また電流波形が正弦波であることを確認する;
3. 該当する帯域を通常の測定の際と同様にレシーバで周波数掃引して電流プローブから出力される信号を測定し、測定された電流 (測定の際

^{†9} AC 電源の場合、電源高調波電流を含む。

(§2.2) と同様に電流プローブの変換インピーダンスなどで補正した後の値) が印加した信号のレベルの ± 3 dB 以内にあることを確認する。

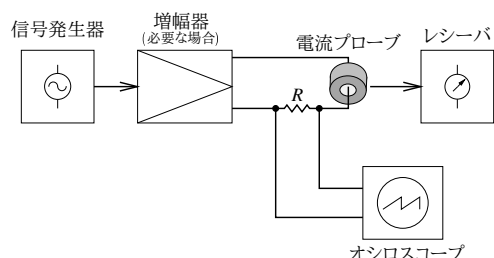


図 8: CE101 — インテグリティ・チェック

2.2 測定

EUT は、§1.6 で述べたように、また 図5～図7 で図示したようにセットアップし、動作させる。

測定は、EUT の電源入力リード (電源帰路を含む) それぞれについて、LISN から 5 cm の位置に電流プローブを取り付けてレシーバに接続し (図9)、§1.7 で述べたように周波数掃引することで行なう。

2.3 限度

限度はその機器の用途や電源条件によって異なり、基本的な限度は 図10 のようになる。

但し、水上船や潜水艦用の機器については、機器の実際の電源電流に応じて以下のように限度を緩和できる：

- DC 電源の場合、電流 I が 3 A から 185 A の場合は $20 \log(I/3)$ 、185 A 以上の場合は 35 dB 緩和する；
- AC 電源 (60 Hz, 400 Hz) の場合、基本波電流 I_1 が 1 A を超える場合は $20 \log(I_1)$ 緩和する。^{†10}

2.4 データの提示

提示するデータには以下の情報を含める：

- インテグリティ・チェック (§2.1) と測定 (§2.2) の双方についての、§1.11で述べたような形のデータ。

3 CE102 (伝導エミッション、無線周波電圧、電源線)

CE102 は電源リードへの 10 kHz～10 MHz のエミッションを LISN を用いて測定するもので、AC や DC の電源入力を持つ全ての機器に適用される。

3.1 インテグリティ・チェック

測定前の測定系の確認は以下に行なう。

1. LISN のインピーダンスのチェック

10.5 kHz、及び 100 kHz のそれぞれについて、LISN の EUT 側の端子に電圧を印加し、以下のように確認を行なう：

- 図 11 (a) のような構成で、ハイ・インピーダンス入力のオシロスコープで測定された端子間電圧が 90 dB μ V (約 30 mV rms) となるように信号発生器の出力を調整し、また電圧波形が正弦波であることを確認する；
- 信号発生器の設定をそのままとして、図 11 (b) のように 50 Ω 入力のオシロスコープで電圧を測定する；
- オシロスコープで測定されたそれらの 2 つの電圧の比^{†11}が、
 - 10.5 kHz — $-14 \text{ dB}_{-2}^{+1} \text{ dB}$
 - 100 kHz — $-3 \text{ dB}_{-2}^{+1} \text{ dB}$
 の範囲にあることを確認する。

2. LISN のロスのチェック

10.5 kHz、100 kHz、1.95 MHz、及び 9.8 MHz のそれぞれについて、LISN の EUT 側の端子に電圧を印加し、以下のように確認を行なう：

^{†10} 基本波電流 I_1 は電源周波数 (60 Hz や 400 Hz) における電流で、図9のようなセットアップでのエミッション測定を電源周波数から行なうことで同定できるだろう。

^{†11} それぞれの電圧を V_L 、 V_N とすると、 $20 \log_{10}(V_L/V_M)$ 。
 $20 \log_{10}(V_L/V_M) = 20 \log_{10}(2 \times Z_{\text{LISN}}/(Z_{\text{LISN}} + 50))$ で、
 10.5 kHz では $Z_{\text{LISN}} \simeq 4.939 + j1.069$ で -14.7 dB 、100 kHz では $Z_{\text{LISN}} \simeq 17.463 + j19.398$ で -2.6 dB の計算となる。

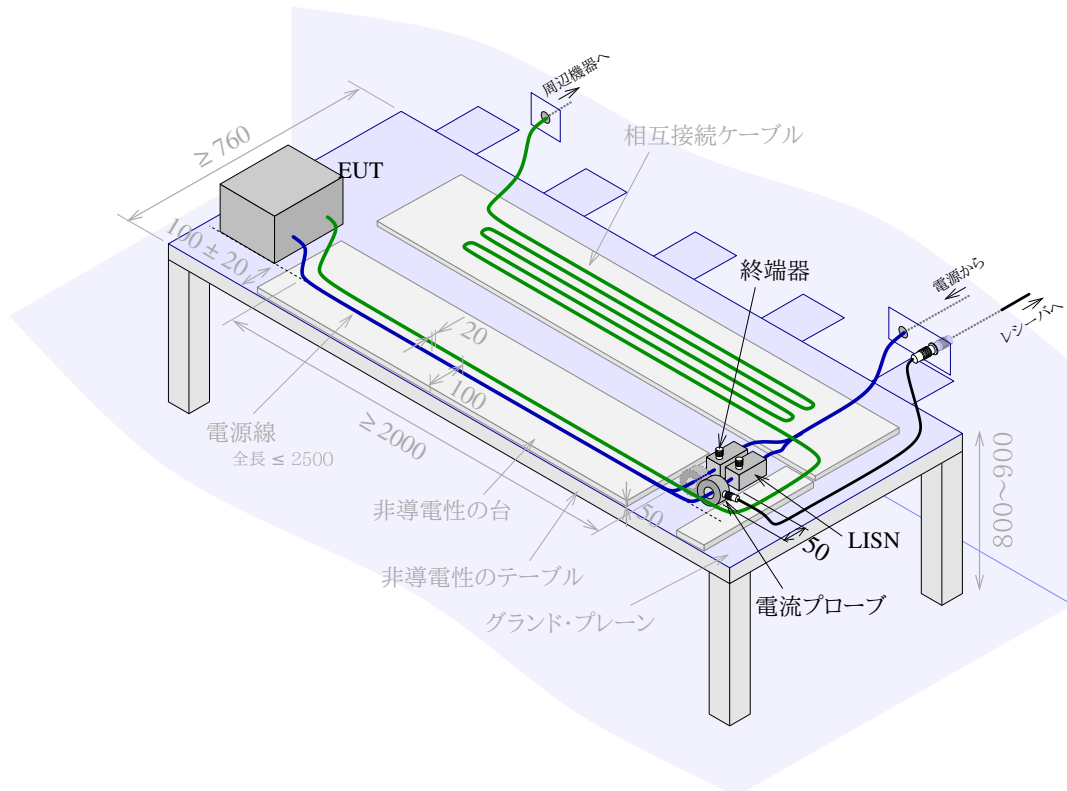


図 9: CE101 — 試験セットアップの例

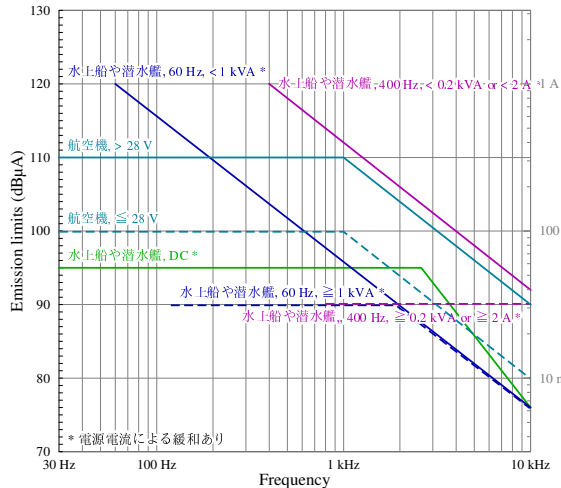


図 10: CE101 — 限度

- (a) 図 12 のような構成で、限度の -6 dB 以下の振幅の信号を LISN の EUT 側の端子に印加する。

印加する信号レベルは、 100 kHz 以下ではハイ・インピーダンス入力のおシロスコープで測定し、 1.95 MHz 以上では信号発生器の設定をそのまま用いる。^{†12}

^{†12} 図 4 に示したように、数百 kHz 以上では LISN の EUT

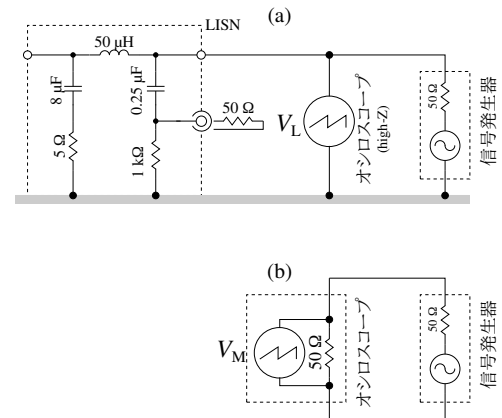


図 11: CE102 — LISN のインピーダンスのチェック

- (b) 該当する帯域を通常の測定の際と同様にレーザーで周波数掃引して LISN から出力される信号を測定し、測定された電圧 (測定の際 (§3.2) と同様に LISN やアッテネータなどの減衰を補正した後の値) が印

側の端子のインピーダンスは 50Ω に近い値となり、信号発生器で設定した電圧がそのまま LISN の EUT 側の端子に印加されると仮定できる。だが、 100 kHz やそれよりも低い周波数では LISN の EUT 側の端子のインピーダンスは 50Ω に近い値となり、LISN の EUT 側の端子に現れる電圧は信号発生器での設定よりも有意に低くなる。

加した信号のレベルの ± 3 dB 以内にあることを確認する。

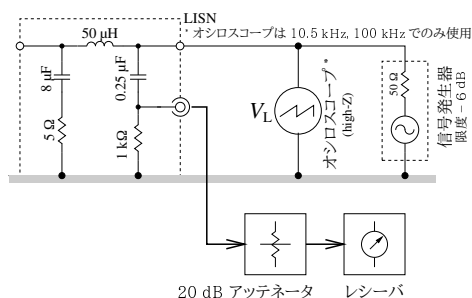


図 12: CE102 — LISN のロスのチェック

3.2 測定

EUT は、§1.6 で述べたように、また 図5～図7 で図示したようにセットアップし、動作させる。

測定は、図9 のように、それぞれの LISN の信号出力ポートから 20 dB アッテネータ^{†13}を介してレシーバに接続し、§1.7 で述べたように周波数掃引することで行なう。^{†14}

測定に際しては LISN やアッテネータなどの減衰の補正が必要となり、LISN の補正係数は §3.5 のようになる。

3.3 限度

限度は電源電圧によって異なり、図14 のようになる。

CE101 (§2) と異なり、用途や電源周波数による限度の違いはない。

3.4 データの提示

提示するデータには以下の情報を含める：

- インテグリティ・チェック (§3.1) と測定 (§3.2) の双方についての、§1.11 で述べたような形のデータ

^{†13} 電源周波数が 400 Hz の場合、LISN の信号出力ポートには電源周波数の 1 V 以上の電圧 (115 V の場合で 3.6 V $\approx$ 130 dB μ V) が現れることがある。20 dB アッテネータはこれを 110 dB μ V 程度以下に低減するが、状況によってはより大きな減衰が、また起こりえる状況に応じた別の保護手段が必要となるかも知れない。

^{†14} EUT と LISN は通常は 2～2.5 m の比較的長いリードで接続されるが、この長さは 10 MHz の電磁波の波長の 1/10 以下であり、その影響 (また、リード長のある程度の違いの影響) は限定的なものとなると期待される。

3.5 LISN の補正係数

この測定で必要となる LISN の補正係数は 0.25 μ F コンデンサでの電圧降下を補正するもので、0.25 μ F コンデンサと 50 Ω $\parallel$ 1 k Ω ^{†15} の分圧比の逆数、

$$\left| \frac{50 \parallel 1000 + \frac{1}{j2\pi f \times 0.25 \times 10^{-6}}}{50 \parallel 1000} \right|$$

より求められ、図15 のようになる。

4 RE101 (放射エミッション、磁界)

RE101 は機器やサブシステムのエンクロージャやケーブルからの 30 Hz～100 kHz の磁界のエミッションを評価するもので、

- 水上船
- 潜水艦
- 駐機整備区域を含む、航空機 (陸軍)
- ソナーや磁気探知機などの 30 Hz～10 kHz で動作する対潜戦 (ASW) 機器を搭載した航空機 (海軍)

で使用される機器に適用される。

このエミッション要求はアンテナからの放射には適用されない。

測定は EUT から 7 cm の距離に置いたループ・センサの出力をレシーバで測定することで行なう。ループ・センサは、直径 13.3 cm、巻き数 36、巻線の直流抵抗 5～10 Ω の、静電遮蔽されたものを用い、補正係数は製造業者のデータを適用する。^{†16}

4.1 インテグリティ・チェック

測定前の測定系の確認は以下のように行なう：

1. 限度からループ・センサの補正係数を引いたものよりも少なくとも 6 dB 低い 50 kHz の信号を測定に際してループ・センサが接続される箇

^{†15} ここで、“ $\parallel$ ” は並列演算子で、50 Ω $\parallel$ 1 k Ω $\approx$ 47.6 Ω 。

^{†16} 面積 S (m²)、巻数 N のループを周波数 f (Hz) の H (A/m) の磁界中に置いた時にループに生じる開放回路電圧は $U_0 = 2\pi f N S \mu_0 H$ と推定されるが、その出力を 50 Ω 系で測定した時の電圧は高い周波数で低下し、これは開放回路電圧のように単純に求めることはできない。

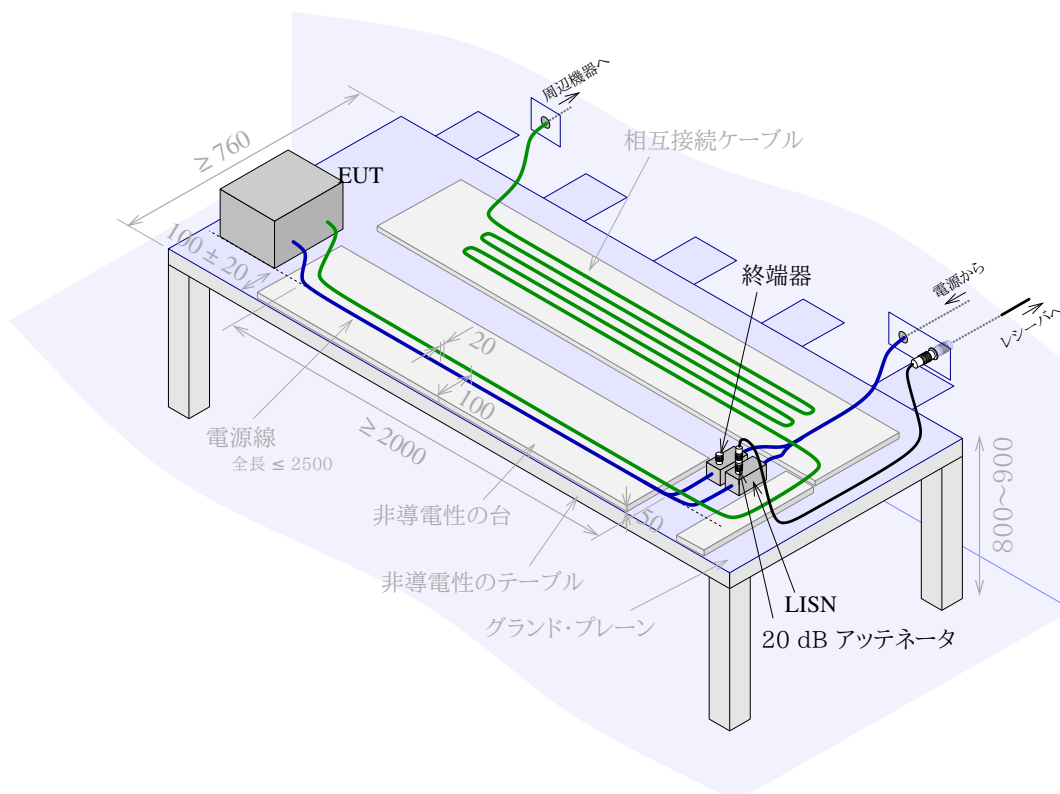


図 13: CE102 — 試験セットアップの例

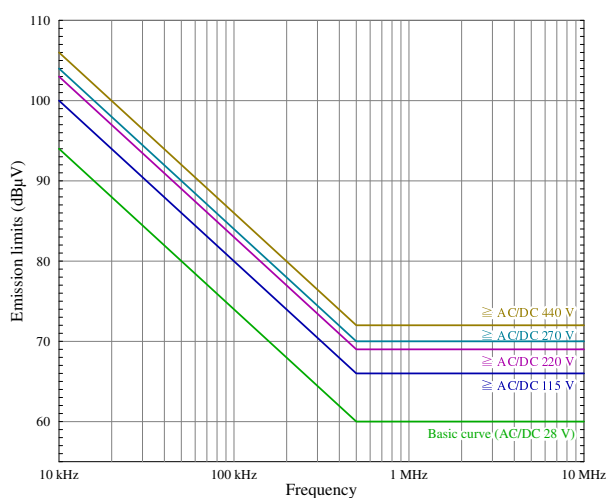


図 14: CE102 — 限度 (全ての用途)

所に印加し、レーザでの読みが印加した信号のレベルの ± 3 dB 以内にあることを確認する;

2. ループ・センサの巻線の抵抗が $5 \sim 10 \Omega$ であることを確認する。

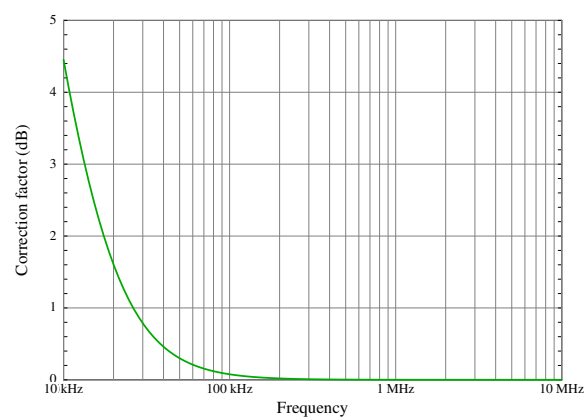


図 15: LISN ($50 \mu\text{H} + 5 \Omega / 50 \Omega$) の補正係数

4.2 測定

EUT は、§1.6 で述べたように、また 図5～図7 で図示したようにセットアップし、動作させる。

測定は EUT のそれぞれの面について以下のよう
に行なう:

1. ループ・センサを EUT の面やコネクタから 7 cm の距離に、その面が EUT の面やコネクタの軸と平行となるように置く；

2. 周波数掃引を行ない、放射が最大となる周波数を 200 Hz 以下ではオクターブ当たり少なくとも 2 つ、200 Hz 以上ではオクターブ当たり少なくとも 3 つ特定する;^{†17†18}
3. 先の手順で特定されたそれぞれの周波数について、

- (a) レシーバの測定周波数をその周波数か周波数帯に合わせ、
- (b) レシーバの出力を監視しながら、7 cm の距離を保ってループ・センサを動かし、それぞれの周波数で放射が最大となる位置を記録し、

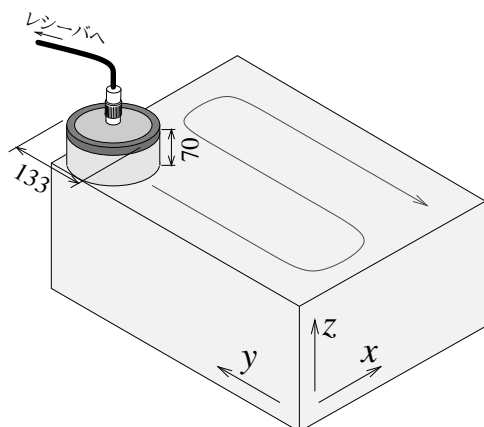


図 16: RE101 — 放射が最大となる位置を探す

- (c) 放射が最大となる位置でループ・センサの面の向きを変えてレシーバの読みが最大となるようにして得られたエミッションのレベル (ループ・センサの補正係数などでの補正後の値) を記録し、
 - (d) 7 cm の距離で測定されたエミッションが限度を超えた場合、エミッションが限度以下となるまで測定距離を長くし、その時のエミッションと測定距離を記録する;
4. EUT のそれぞれの面、またそれぞれのコネクタについて、上記の作業を繰り返す。

^{†17} 30 Hz~200 Hz は 3 オクターブ弱、200 Hz~100 kHz は 9 オクターブであるので、30 Hz~100 kHz では周波数の数は 33 程度以上となる。

^{†18} このステップでループ・センサを動かすようには述べられていないが、EUT が大きい場合は特に、局所的なエミッションを見逃さないように周波数掃引を行ないながらループ・センサを動かした方が良いかも知れない。

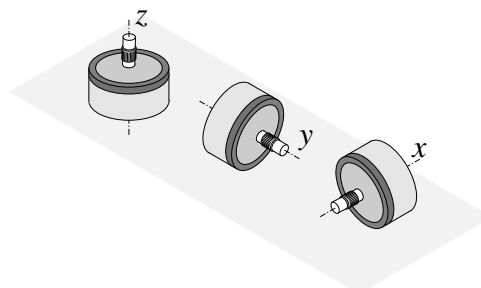


図 17: RE101 — ループの向きを変える

4.3 限度

限度は陸軍か海軍か (空軍向けのものとは通常は対象とならない) による違いがあるだけで、[図 18](#) のようになる。

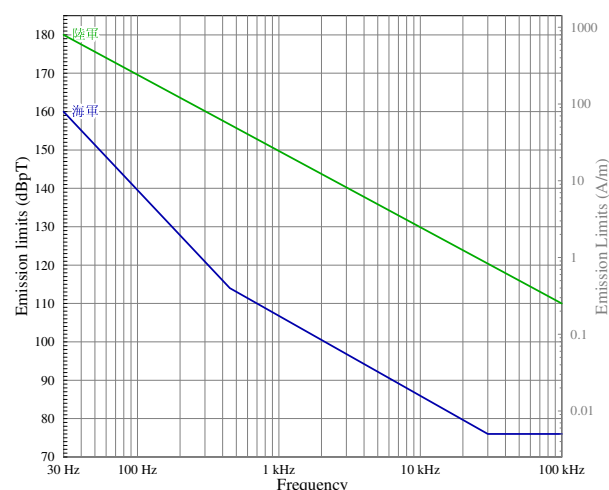


図 18: RE101 — エミッション限度

4.4 データの提示

提示するデータには、掃引のグラフ、及びそれぞれの測定周波数、動作モード、測定された磁界の強さ、及び磁界限度の表を含める。

5 RE102 (放射エミッション、電界)

RE102 は機器やサブシステムのエンクロージャからのエミッションを評価するもので、船舶や潜水艦、陸軍や海軍の航空機、宇宙用の機器では 10 kHz~18 GHz、地上、空軍の航空機用の機器では 2 MHz~18 GHz の周波数範囲に適用される。

アンテナが恒久的に取り付けられた機器については、この要求は送信の基本周波数と必要な占有帯域幅内には適用されない。

5.1 インテグリティ・チェック

測定に先立って、下記のように既知の信号を測定系に注入した状態で該当する帯域を通常の測定の際と同様にレシーバで周波数掃引して測定し、得られた値を確認する：

- ロッド・アンテナ (10 kHz～30 MHz)

ロッドを外し、10.5 kHz (10 kHz～2 MHz の測定がある場合)、2.1 MHz、12 MHz、及び 29.5 MHz で、限度よりも少なくとも 6 dB 下に対応するレベルの信号を図 19 のようにコンデンサ (標準的には 10 pF であるが、製造業者の指示による)^{†19}を通して注入し、その状態で測定して得られた値 (アンテナ係数などによる補正後の値) が注入した信号のレベル ±3 dB の範囲にあることを確認する。

この確認での市販の校正治具や注入回路網の使用は明示的に禁止されている。^{†20}

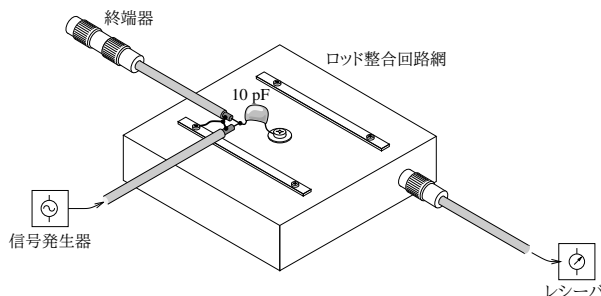


図 19: RE102 — ロッド・アンテナのチェック

- その他 (30 MHz～)

アンテナを測定系の同軸ケーブルから外し、197 MHz、990 MHz、及び 17.5 GHz で、限度よりも少なくとも 6 dB 下に対応するレベルの信号を測定時にアンテナが接続される箇所に

^{†19} このコンデンサは 104 cm ロッドの自己容量を代表するもので、エレメントの太さなどによってやや異なる値が必要となる可能性もある。CISPR 16-1-6:2014^[7]によれば、ロッドが長さ h 、直径 a の場合の自己容量 C_a は $C_a = \frac{55.6h}{\ln(h/a) - 1} \frac{\tan(2\pi h/\lambda)}{2\pi h/\lambda} \approx \frac{55.6h}{\ln(h/a) - 1}$ で、 $h = 1.04$ m、 $a = 5$ mm では $C_a = 13.3$ pF の計算となる。

^{†20} この確認に適した治具の例は [8] や [9] も参照。

注入し、その状態で測定して得られた値 (アンテナ係数による補正は行なわない) が注入した信号のレベル ±3 dB の範囲にあることを確認する。

測定系の変更、例えば同軸ケーブルの変更、プリアンプの追加/取り外し、レシーバの別のポートの使用などがあれば、それについても同様に確認を行なう。

さらに、アンテナに物理的な損傷がないことを確認し、また通常の測定と同様にアンテナを接続してそれぞれのアンテナの最大の周波数でスタブ・ラジエータから放射した信号を受信できることを確認する。

この確認で用いるスタブ・ラジエータとしては、その帯域をカバーするコム・ジェネレータがあればそれを使用できるであろうが、そのような機材がない場合、図 20 のように片端で適当な長さ外部導体 (シールド) を取り除いた同軸ケーブルと信号発生器を用いることができる。^{†21}

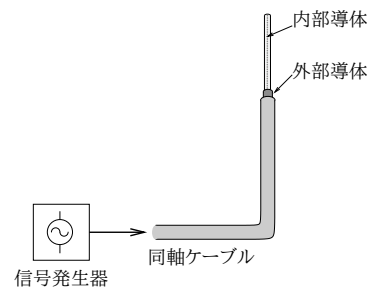


図 20: RE102 — スタブ・ラジエータの例

5.2 測定

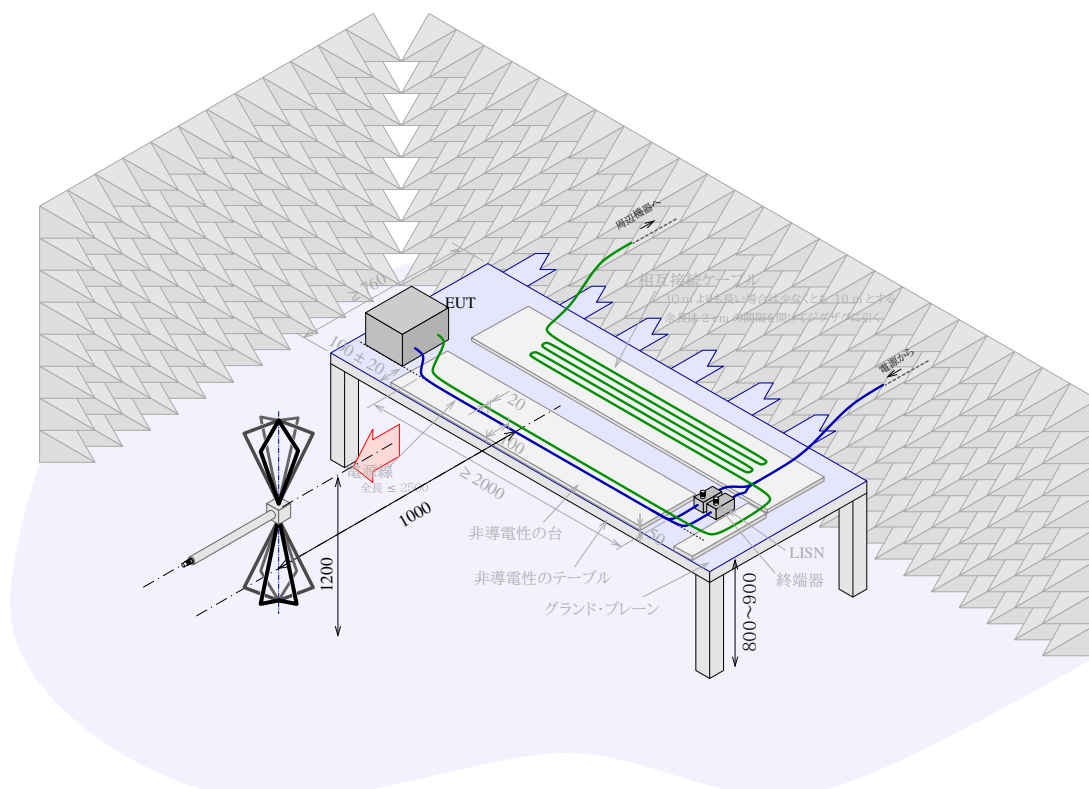
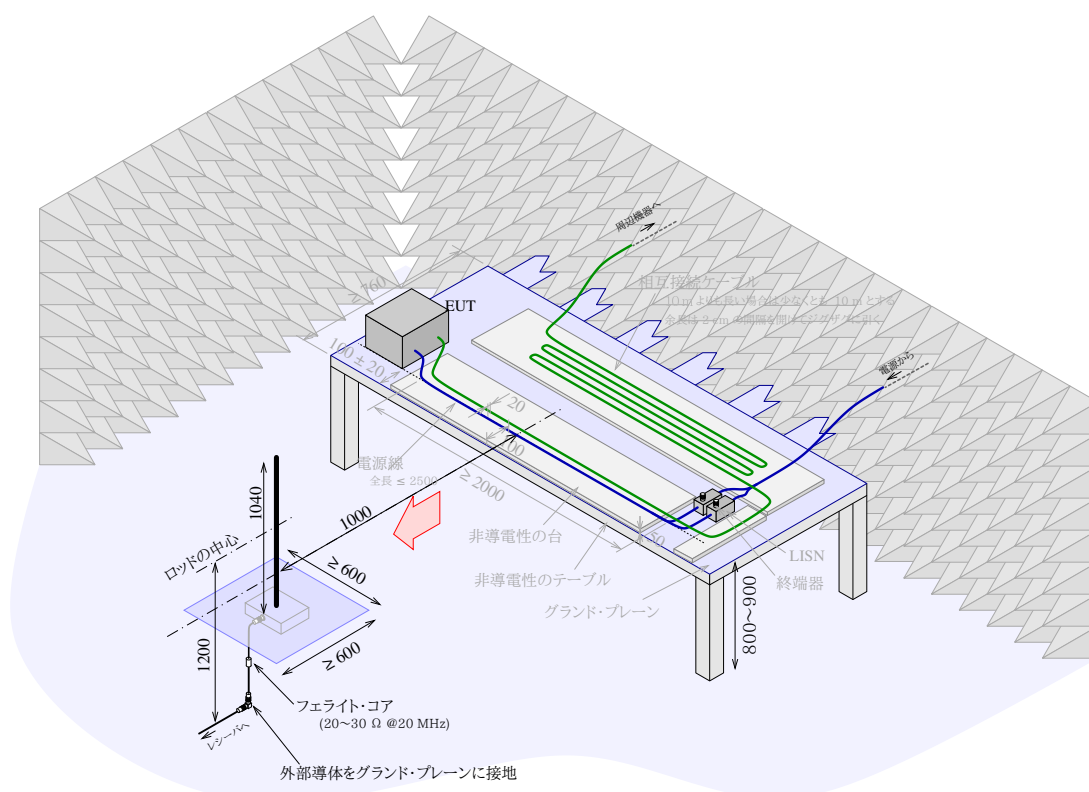
EUT は、§1.6 で述べたように、また 図 5～図 7 で図示したようにセットアップし、動作させる。

アンテナは以下のものを用い、アンテナ係数は ARP958^[6] に従って求める：

- 10 kHz～30 MHz:

104 cm ロッド・アンテナ

^{†21} 規格上はこの確認はそれぞれのアンテナの最大の周波数でのみ要求されている。また、これについては値の記録も要求されておらず、許容幅も適用されない。だが、この確認やその記録は有用なものとなり得るので、観測された信号レベルの記録と確認を、可能であればコム・ジェネレータを用いて最大の周波数だけでなく周波数範囲全体について行なうことを考えても良いように思われる。



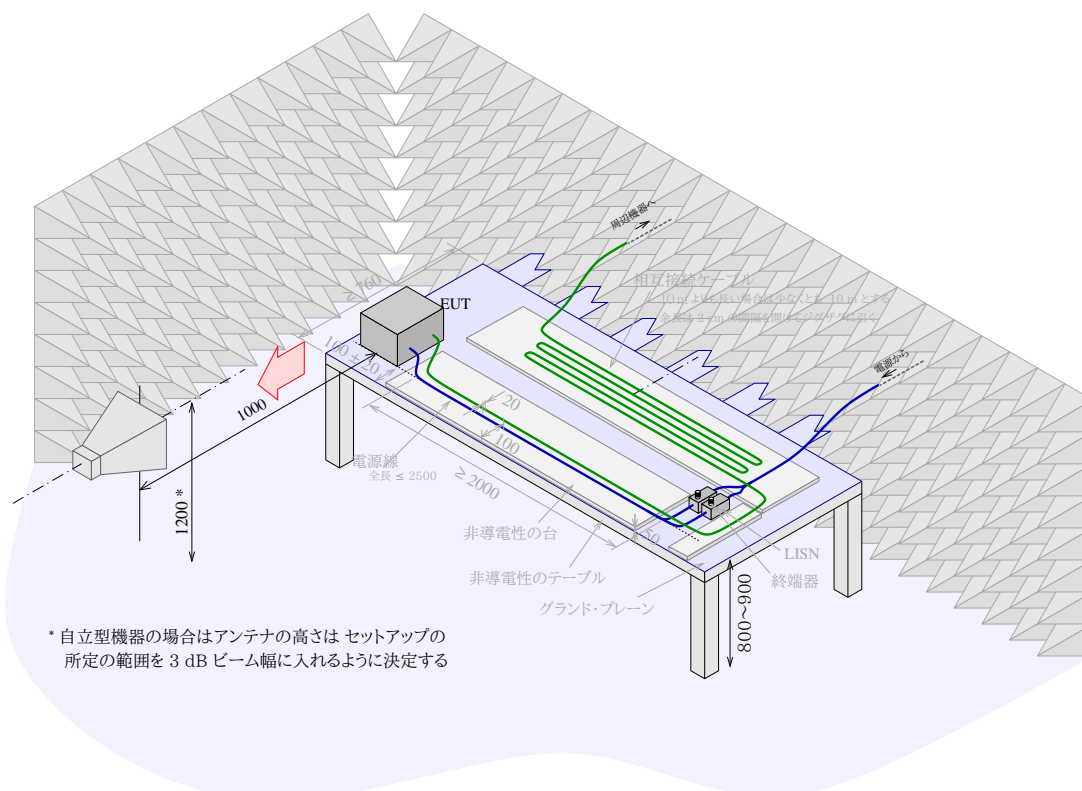
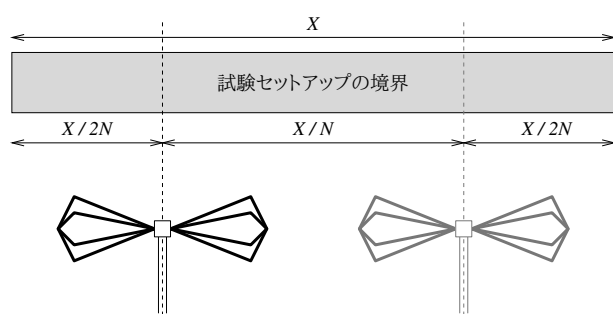


図 23: RE102 — 試験セットアップの例 (> 200 MHz)



N は $X/3$ を整数に切り上げたもの ($N = \lceil X/3 \rceil$) で、例えば $X = 4 \text{ m}$ であれば $N = \lceil 4/3 \rceil = 2$ 、 $X/N = 2 \text{ m}$ 、 $X = 5 \text{ m}$ であれば $N = \lceil 5/3 \rceil = 2$ 、 $X/N = 2.5 \text{ m}$ となる。

図 24: RE102 — アンテナの水平方向の位置 ($f < 200$ MHz)

- 30～200 MHz:
バイコニカル (長さ 137 cm)
- 200 MHz～1 GHz:
ダブルリッジ・ホーン (開口 69.0×94.5 cm)
- 1～18 GHz:
ダブルリッジ・ホーン (開口 24.2×13.6 cm)

受信アンテナは図 21～図 23 のようにそのセット

アップから 1 m の距離に置き、アンテナの左右の位置、また高さは、周波数とセットアップに応じて以下のように決定する:

- < 200 MHz (Fig 21, Fig 22)

セットアップの幅が 3 m 以下であればその幅の中心で、さもなくばセットアップの幅を X (m)、 N を $X/3$ を整数に切り上げたものとして X/N の間隔の複数の位置で測定する (図 24)。

アンテナの高さは床面のグラウンド・プレーンから 120 cm とする。

- 200 MHz~1 GHz (図 23)

EUT のエンクロージャ全面と EUT に接続されたケーブルの最初の 35 cm を 3 dB ビーム幅に入れるように、必要に応じて複数の位置で測定する。^{†22}

アンテナの高さは、EUT がテーブル上に配置されている場合は床面のグランド・プレーンか

^{†22} この周波数帯で使用されるアンテナ (例えば ETS-Lindgren 3106B や Schwarzbeck BBHA 9120 F) の 3 dB ビーム幅は 30° 程度まで小さくなるかも知れず、これは距離 1 m で約 50 cm に相当する。

ら 120 cm、自立型機器 (図 7) の場合は上の条件を満たすようにする。

- ≥ 1 GHz (図 23)

EUT のエンクロージャ全面と EUT に接続されたケーブルの最初の 7 cm を 3 dB ビーム幅に入れるように、必要に応じて複数の位置で測定する。^{†23}

アンテナの高さは、EUT がテーブル上に配置されている場合は床面のグラウンド・プレーンから 120 cm、自立型機器 (図 7) の場合は上の条件を満たすようにする。

30 MHz 以下では測定は垂直偏波のみで行なうが、30 MHz 以上では垂直偏波と水平偏波の双方で測定し、双方が限度に入らなければならない。

いずれの場合も、アンテナは、シールド・エンクロージャの壁から 1 m、床や天井から 0.5 m 以内に近付かないようにする。

5.3 限度

限度は機器の用途やプラットフォームのどの場所に取り付けられるかなどによって異なる (図 25)。

水上船用の機器の場合は基本的には船体などの金属構造の内側である甲板下とその外側である甲板上とに分類されるが、艦橋、格納庫、ポート・ベイなど、十分なシールドを与えない材料で囲まれた場所や開かれた時にはその内部を外部の電磁環境に曝すような大きな開口部のある場所 (“甲板下で露出”) も甲板上と同様に扱われる。

潜水艦の場合もこれと似ており、耐压殻の内側か外側かで区別される。

航空機も機内か機外かで区別されるが、ヘリコプターは機外と同様に扱われ、また機内については機体の全長が 25 m 以内かどうかでも限度が異なる。

地上については、陸軍、海軍、空軍のいずれのためのであるかによって、また海軍については可搬型 (主に海兵隊用のものが想定される) であるかどうかによって限度が異なる。

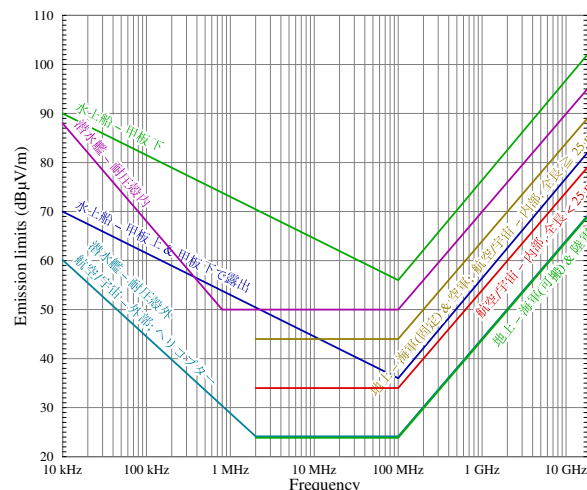


図 25: RE102 — 限度

5.4 データの提示

提示するデータには以下の情報を含める:

- インテグリティ・チェック (§5.1) と測定 (§5.2) の双方についての、§1.11 で述べたような形のデータ;
- アンテナの導通を §5.1 で述べたように確認した旨。

6 参考: 車載機器のエミッション限度との比較

車載機器に対するエミッションの規格である CISPR 25^{[2][3]} でも MIL-STD-461G と似た試験法が用いられる。

ここでは、参考までに、図 26 に CE102 と CISPR 25:2016 電圧法の限度の対比を、また 図 27 に RE102 と CISPR 25:2016 ALSE 法と ECE R10.06^{[4][5]} の限度の対比を示す。CISPR 25 は Class 1~5 の限度が、また多くの帯域については尖頭値 (PK)、準尖頭値 (QP)、及び平均値 (AV) の限度が規定されているが、ここでは Class 5 の PK の限度のみを示している。

7 参考資料

- [1] MIL-STD-461G, *Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment*, Department of Defense, 2015

^{†23} この周波数帯で使用されるアンテナ (例えば ETS-Lindgren 3115 や Schwarzbeck BBHA 9120 D) の 3 dB ビーム幅は 7° 程度まで小さくなるかも知れず、これは距離 1 m で約 12 cm に相当する。このような小さいビーム幅で EUT のエンクロージャ全面とケーブル 7 cm を 3 dB ビーム幅に入れるためには、位置を変えての測定を相当の回数繰り返すことが必要となることがある。

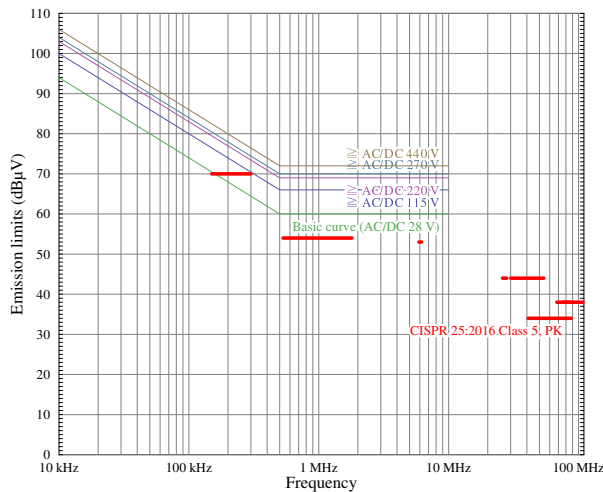


図 26: RE102 と CISPR 25:2016 電圧法の限度の比較

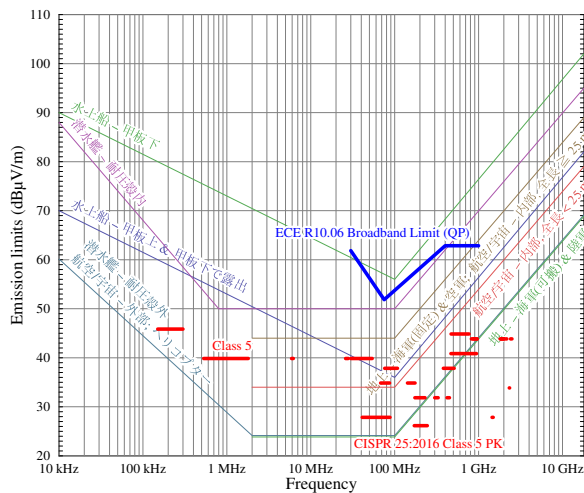


図 27: RE102 と CISPR 25:2016 ALSE 法の限度の比較

- [2] CISPR 25 ed. 4 (2016), *Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers*, IEC, 2016
- [3] CISPR 25 の概要, 株式会社 e・オートマ, 2016, <https://www.emc-ohatama.jp/emc/reference.html>
- [4] ECE Regulation No. 10 Revision 6, *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to electromagnetic compatibility*, United Nations, 2019
<https://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs1-20.html>
- [5] ECE Regulation No. 10.06 の概要, 株式会社 e・オートマ, 2014–2020, <https://www.emc-ohatama.jp/emc/reference.html>
- [6] SAE ARP958, *Electromagnetic Interference Measurement Antennas; Standard Calibration Method*

[7] CISPR 16-1-6:2014, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – EMC antenna calibration*

[8] *Use of the 41" Rod Antenna in Electromagnetic Interference Testing; A Brief Chronology*, EMC Compliance, 2010

[9] *Comparison of calibration methods for monopole antennas, with some analysis of the capacitance substitution method (NPL report DEM – EM 005)*, D A Knight et al., National Physical Laboratory, Division of Enabling Metrology, 2004,

<http://eprintspublications.npl.co.uk/3108/>