

# 軍需機器の EMC — MIL-STD-461G の概要

## Part 3: 雷誘導トランジェント、及び過渡電磁界へのサセプティビリティ (CS117, RS105)

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2020 年 8 月 31 日

### 目次

<b>1 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)</b>	<b>1</b>
1.1 校正	2
1.2 試験	3
1.3 データの提示	6
1.4 補足	6
<b>2 RS105 (放射サセプティビリティ、過渡電磁界)</b>	<b>8</b>
2.1 校正	8
2.2 試験	8
2.3 データの提示	9
2.4 補足	9
<b>3 参考資料</b>	<b>11</b>

MIL-STD-461G で規定されている試験のうち、一般的なエミッション試験、及びサセプティビリティ試験については、このシリーズの Part 1、及び Part 2<sup>[5]</sup> で述べた。

本稿では、MIL-STD-461G で規定されている試験のうち、表1 で太字で示した、雷や核爆発の影響で生じるような比較的高エネルギーの過渡妨害に対するサセプティビリティ試験について、その概要を述べる。本稿では Part 1 や Part 2 で述べた一般的な事項には触れないので、そのような事項については Part 1 や Part 2<sup>[5]</sup> を参照されたい。

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<sup>[1]</sup> や関連する公式な文書を参照されたい。

## 1 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)

CS117 は雷からの誘導によってケーブル上に生じるような過渡妨害の影響を模擬するもので、

- 安全クリティカル機器<sup>i1</sup>の相互接続ケーブル、電源ケーブル、及びハイ側の電源リード
- 非安全クリティカル機器の相互接続ケーブルや電氣的インターフェースで、安全クリティカル機能を実行する機器の一部となる、あるいはそれに接続されるもの
- 調達機関が指定した非安全クリティカル機器

<sup>i1</sup> システムの安全な運用や使用のために重要な機器で、例えばその機能が損なわれた時に航空機の墜落が引き起こされ得るような機器はこれに該当する。



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 kHz～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 kHz～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

に適用される。

CS117 は雷の直接的な影響や近傍の雷の影響はカバーしない。<sup>†2</sup>

要求は内部機器か外部機器かで異なり、外部機器に対しては内部機器よりも厳しい要求が適用される(表2)。

通常、内部と外部のいずれの要求を適用すべきかは調達機関が規定するだろうが、

- 基本的には、機器やそのケーブルがプラットフォームの導電性の外殻の内側に設置されて外部の電磁環境から保護が期待できるならば内部、そうでないならば外部と判断できる;
- 航空機の手輪格納庫や爆弾投下室のような特定の状況で外部の電磁環境に対して露出される場所に設置される場合、外部機器として扱うことが必要となるだろう;
- 機器がプラットフォームの導電性の外殻の内側に設置されるが、一部のケーブルが外殻の外側に

<sup>†2</sup> 深刻な被害を生じることが稀であるが、航空機はかなり頻繁に雷撃を受けている [6]。MIL-STD-464C<sup>[2]</sup> は、直撃雷に対するものとしてピーク電流 200 kA の、また雷の間接的な影響に対するものとして第 1 ストロークのピーク電流が 100 kA の多重ストロークやピーク電流が 10 kA の多重バーストへの言及を含む。

引き出される場合、そのケーブルには外部の要求の適用が必要となるだろう。

## 1.1 校正

- 図 1 のように接続する。

校正ループは、低インピーダンスの、表 2 のような電流を流した時に過熱などの問題を生じないようなものとする。

- それぞれの波形について、試験レベルが電圧 ( $V_T$ ) で規定されている場合は校正ループを開いた状態で電圧モニタ・プローブで観測された電圧が、試験レベルが電流 ( $I_T$ ) で規定されている場合は校正ループを閉じた状態で電流モニタ・プローブで観測された電流が試験レベル(表 2) となるように過渡妨害発生器を調整してその波形を記録し、その波形のパラメータが規定を満たすことを確認する。

対応する制限レベル ( $I_L$  か  $V_L$ ) <sup>†3</sup> を発生できる必要はない<sup>†4</sup>が、制限レベルを発生できるの

<sup>†3</sup> 試験レベルが電圧 ( $V_T$ ) の場合は電流の制限レベル ( $I_L$ ) が、試験レベルが電流 ( $I_T$ ) の場合は電圧の制限レベル ( $V_L$ ) が規定される。

<sup>†4</sup> 試験時、制限レベルよりも先に試験レベルに達すればそれ以上妨害のレベルを上げる必要はなく、この場合は制限レベル

であればその設定での波形も記録し、またその波形のパラメータが規定を満たすことも確認する。<sup>†5</sup>

- 多重ストローク (図7) や多重バースト (図8) のパラメータも確認する。
- 過渡妨害発生器の極性を逆にして同様の確認を行なう。

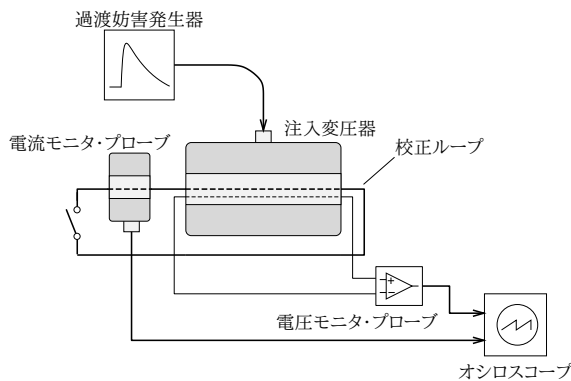


図1: CS117 — 校正のための接続の例

## 1.2 試験

試験は、EUT に接続される線の束に対して、次のように行なう (図3):

- EUT のそれぞれのコネクタに接続されるそれぞれの線の束を一括で試験する;
- 電源線は、電源導体全て (帰路導体を含む) の一括での試験に加えて、帰路導体と接地線を除外しても試験する;
- その線の束に相互接続線と電源線の双方が含まれる場合、その線の束全体の一括での試験に加えて、電源導体全て (帰路導体を含む) を一括で試験し、またそれから帰路導体と接地線を除外しても試験する。

試験対象となるそれぞれの線の束に対する試験は次のように行なう:

<sup>†5</sup> 発生できなくても適切に試験を行なえる。従って、制限レベルを発生できることが望ましいであろうものの、それは必須ではない。

<sup>†5</sup> 制限レベルを発生でき、またその波形が要求を満たすことをここで確認しておけば、試験時に試験レベルよりも先に制限レベルに達した時、追加の確認なしでその設定で試験を行なえる。

1. EUT はこのシリーズの Part 1 や Part 2<sup>[5]</sup> の「EUT の設置と動作」で述べたようにセットアップし、動作させる。
2. LISN の入力側で、DC 電源の場合は電源導体間に 28,000  $\mu\text{F}$  以上の、AC 電源の場合は各電源導体と接地のあいだに 10  $\mu\text{F}$  のコンデンサを接続する (図4)。<sup>†6</sup>
3. 図2 に示すように、妨害の注入を行なう線の束の EUT から 5~15 cm の位置 (コネクタのバックシールドの長さが 15 cm 以上ある場合などはそのできる限り近く) にモニター・プローブを、モニター・プローブから 5~50 cm の位置に注入変圧器を取り付ける。
4. 過渡妨害発生器を所定の過渡妨害を発生させるように設定し、オシロスコープで観測された電圧か電流が先に制限レベル ( $I_L$  か  $V_L$ ) に達しない限り、試験レベル ( $V_T$  か  $I_T$ ) に達するまで過渡妨害発生器の振幅を増加させ、波形を記録する。<sup>†7</sup>

所定のレベルの達成のために必要な場合、注入変圧器の構成を変更し、改めて校正 (§1.1) の手順を実施する。<sup>†8</sup>

試験レベル ( $V_T$  か  $I_T$ ) よりも前に制限レベル ( $I_L$  か  $V_L$ ) に達した場合、

- (a) 校正 (§1.1) でその制限レベル ( $I_L$  か  $V_L$ ) で波形が規格の要求に適合することが確認されていた、あるいは
- (b) 試験時に確認された波形が規格の要求に適合する

ならばその試験は許容できる。

波形のレベル (ピーク) の測定では短いスパイクや高周波のノイズは無視する (図5)。この測定は、オシロスコープの自動測定の機能を用いずに、不必要なノイズやオーバーシュートに

<sup>†6</sup> 安定化電源から給電する場合は特に、電源の保護のために追加の保護が必要となるかも知れない。

<sup>†7</sup> 試験時にはオシロスコープで観測された波形が試験レベルに達するように過渡妨害のレベルを調整するが、先に制限レベルに達した場合、制限レベルでの波形が要求を満たすことが校正 (§1.1) で確認されている、あるいは試験時に観測された波形が要求を満たすならば、その状態で試験を行なうことができる。

<sup>†8</sup> 試験レベルを発生できることは校正 (§1.1) で確認されるが、この確認は電圧 ( $V_T$ ) は開放状態で、電流 ( $I_T$ ) は短絡状態で行なわれ、試験時にその試験レベルを発生できるとは限らない。

適用	波形	内部機器でのレベル **	外部機器でのレベル **
<p><b>多重ストローク</b></p>			
全ての設置		<p>第1ストローク  <math>V_L = 300\text{ V (WF2)}</math>  <math>I_T = 600\text{ A (WF1)}</math>  <math>I_T = 60\text{ A}^*</math>                      後続ストローク  <math>V_L = 150\text{ V (WF2)}</math>  <math>I_T = 150\text{ A (WF1)}</math>  <math>I_T = 30\text{ A}^*</math></p>	<p>第1ストローク  <math>V_L = 750\text{ V (WF2)}</math>  <math>I_T = 1500\text{ A (WF1)}</math>  <math>I_T = 150\text{ A}^*</math>                      後続ストローク  <math>V_L = 375\text{ V (WF2)}</math>  <math>I_T = 375\text{ A (WF1)}</math>  <math>I_T = 75\text{ A}^*</math></p>
全ての設置		<p>第1ストローク  <math>V_T = 600\text{ V (WF3)}</math>  <math>I_L = 120\text{ A (WF3)}</math>  <math>I_L = 24\text{ A}^*</math>                      後続ストローク  <math>V_T = 300\text{ V (WF3)}</math>  <math>I_L = 60\text{ A (WF3)}</math>  <math>I_L = 12\text{ A}^*</math></p>	<p>第1ストローク  <math>V_T = 1500\text{ V (WF3)}</math>  <math>I_L = 300\text{ A (WF3)}</math>  <math>I_L = 60\text{ A}^*</math>                      後続ストローク  <math>V_T = 750\text{ V (WF3)}</math>  <math>I_L = 150\text{ A (WF3)}</math>  <math>I_L = 30\text{ A}^*</math></p>
複合材の面や構造材の領域を引かれる設置		<p>第1ストローク  <math>V_L = 300\text{ V (WF4)}</math>  <math>I_T = 1000\text{ A (WF5A)}</math>  <math>I_T = 300\text{ A}^*</math>                      後続ストローク  <math>V_L = 75\text{ V (WF4)}</math>  <math>I_T = 200\text{ A (WF5A)}</math>  <math>I_T = 150\text{ A}^*</math></p>	<p>第1ストローク  <math>V_L = 750\text{ V (WF4)}</math>  <math>I_T = 2000\text{ A (WF5A)}</math>  <math>I_T = 750\text{ A}^*</math>                      後続ストローク  <math>V_L = 187.5\text{ V (WF4)}</math>  <math>I_T = 400\text{ A (WF5A)}</math>  <math>I_T = 375\text{ A}^*</math></p>
<p><b>多重バースト</b></p>			
全ての設置		<p><math>V_T = 360\text{ V (WF3)}</math>  <math>I_L = 6\text{ A (WF3)}</math></p>	<p><math>V_T = 900\text{ V (WF3)}</math>  <math>I_L = 15\text{ A (WF3)}</math></p>
短い低インピーダンスのケーブル束を用いる設置 †		<p><math>V_L = 600\text{ V (WF6)}</math>  <math>I_T = 30\text{ A (WF6)}</math></p>	<p><math>V_L = 1500\text{ V (WF6)}</math>  <math>I_T = 75\text{ A (WF6)}</math></p>

\* 個別の電源リードや線数が少ないバンドルに適用。複数のリードを一括で試験する場合はその線数倍の値かその上に書かれた値を用いる。

\*\*  $V_T$  は試験電圧、 $I_T$  は試験電流、 $V_L$  は制限電圧、 $I_L$  は制限電流で、振幅の許容差は後続ストロークは +50%、-0%、その他は +20%、-0%。

† 例えば、両端で 360° 終端された、非常に良くシールドされたケーブル。

表 2: CS117 — 試験レベルと制限レベル

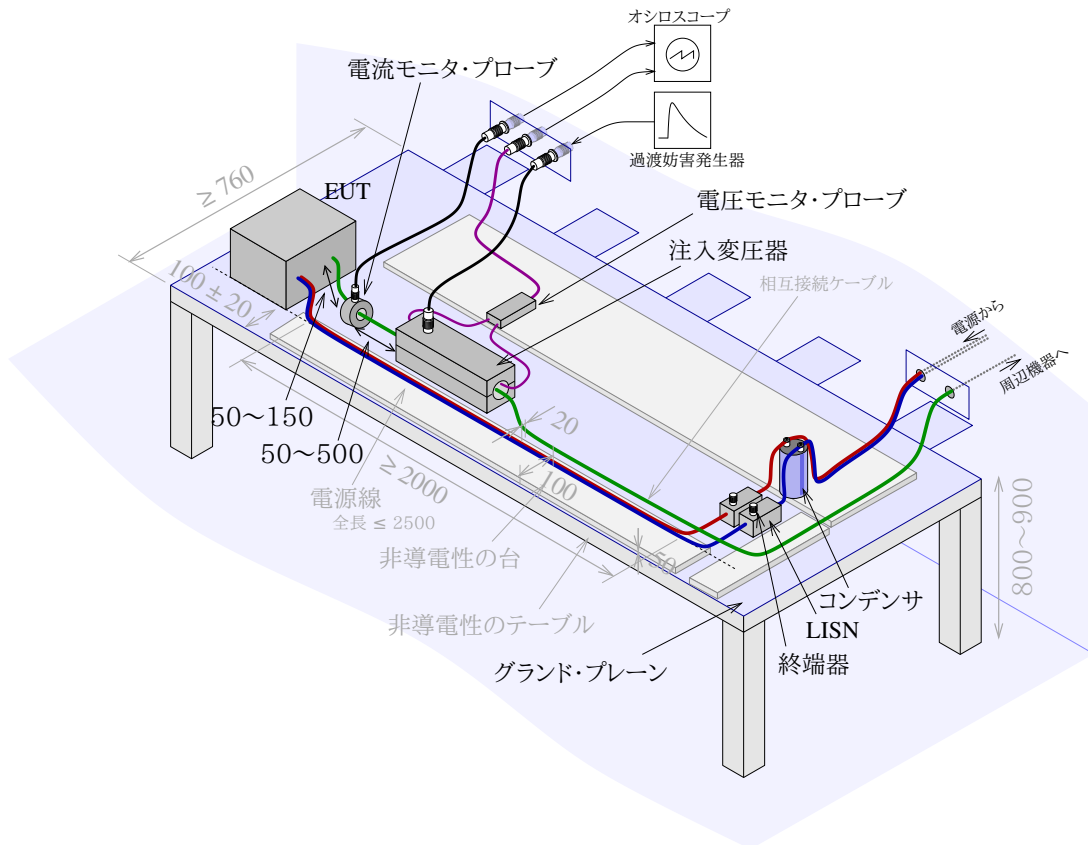


図 2: CS117 — 試験セットアップの例

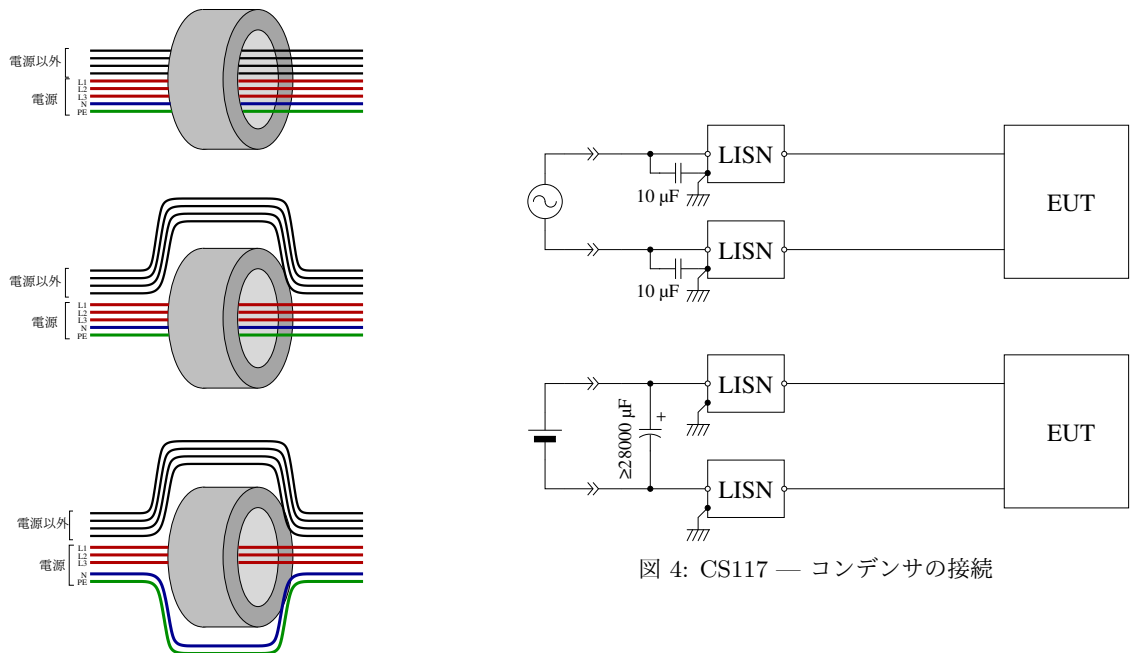


図 4: CS117 — コンデンサの接続

図 3: CS117 — 電源線を含む線の束の試験

よって高い値を測定しないように注意しながらカーソルを用いて手で行なうべきである。<sup>†9</sup>

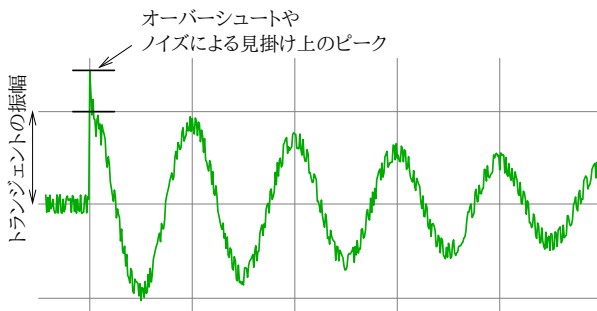


図 5: 過渡妨害の振幅の測定

- 多重ストローク試験では、多重ストローク (第 1 ストロークと 13 回の後続ストロークで 1 セット) を少なくとも 10 回、5 分よりも長くない間隔で印加する (図 7)。<sup>†10</sup>

多重バースト試験では、少なくとも 5 分間、3 秒毎に過渡妨害のバースト (20 回のストロークを 3 回で 1 セット) を印加する (図 8)。

- 過渡妨害の極性を変えて同様の作業を繰り返す。

### 1.3 データの提示

提示するデータには以下の情報を含める:

- それぞれのケーブルやリードに対して試験が行なわれた波形と振幅の一覧;
- 校正波形;
- 試験されたそれぞれのケーブルやリードでの試験波形 (各極性で 1 つ)。

<sup>†9</sup> ピーク値を自動で測定した場合、あるいはカーソルを手で合わせる際にオーバーシュートやノイズに影響されて高い位置にカーソルを合わせた場合、振幅が高く測定され、試験が有意に甘くなる可能性が予想される。MIL-STD-461G §A.5.15 にはいくつかの波形に対する振幅の測定の例も示されている。

<sup>†10</sup> 雷はしばしば 10~100 ms 程度の休止を挟んでの 2~30 回程度の後続雷撃を伴う。後続雷撃は先の放電で既に形成された放電経路を通るため高速で進展し、その雷電流の波頭長 (立ち上がり時間) は第 1 雷撃のそれよりもかなり短くなるが、CS117 では同じ形状の、だがピーク値の低いパルスの列が用いられている。雷撃は数 100 ms 持続するテール電流を伴うこともあり、これが運ぶ多くの電荷が被害をもたらす可能性もあるが、これは CS117 での模擬が意図されている雷の間接的な影響にはあまり関係しない。

### 1.4 補足

- 電流モニタ・プローブは測定する電流波形とその振幅に応じて適切なものを選択することが必要である。

例えば Waveform 1 の測定には、下側のカットオフ周波数が 10 Hz 程度以下、上側のカットオフ周波数が 1 MHz 程度以上の、パルスの振幅に見合った変換インピーダンスの電流プローブを使用できるであろう。ここで、下側のカットオフ周波数が 100 Hz のプローブではパルス幅に、上側のカットオフ周波数が 100 kHz のプローブでは立ち上がり時間に有意に影響が出ることが予想される (図 6)。

Waveform 3 (1 MHz、及び 10 MHz) や Waveform 6 の測定のためには、上側のカットオフ周波数がより高い電流プローブが必要となる。

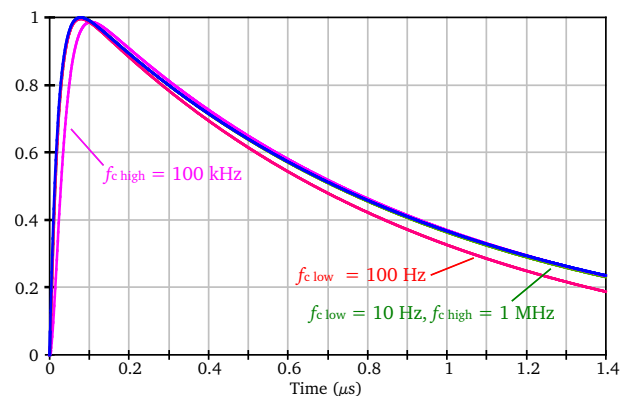


図 6: CS117 — Waveform 1 の測定への電流プローブの周波数応答の影響

- 周辺機器のセットアップについての規定はないが、EUT への過渡妨害の注入を妨げないためには注入変圧器の位置から見た周辺機器の共通・モード・インピーダンスは低いことが必要で、このため、周辺機器をシールド・エンクロージャ (グラウンド・プレーン) に低インピーダンスで接地することが必要となるかも知れない。
- 試験されているケーブルに接続された周辺機器にも高レベルの過渡妨害が印加されるので、周辺機器の選択やその接続はその影響を考慮して行なうべきである。



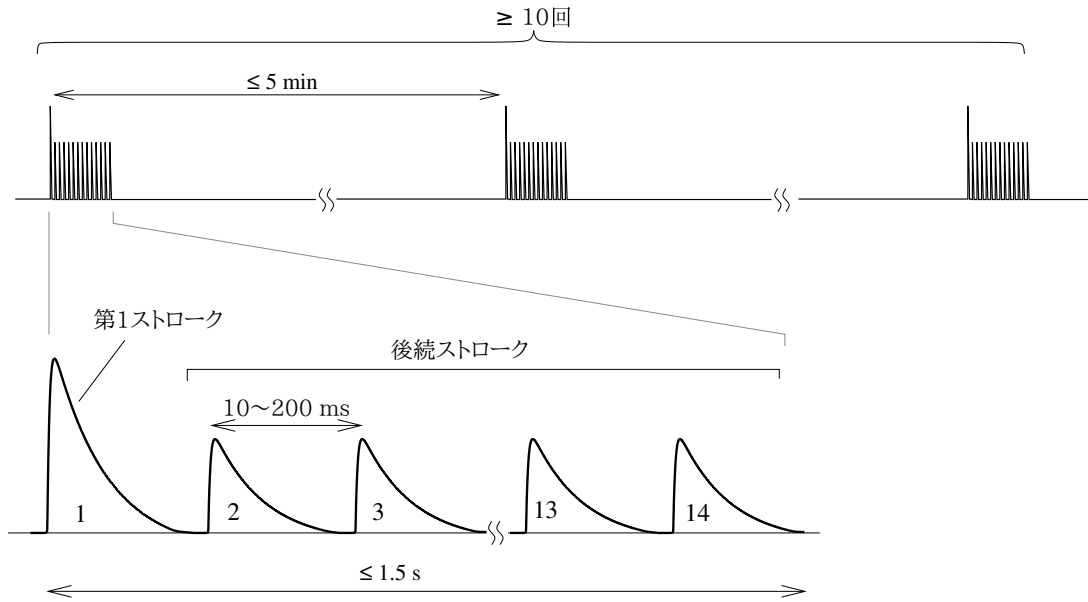


図 7: CS117 — 多重ストローク試験

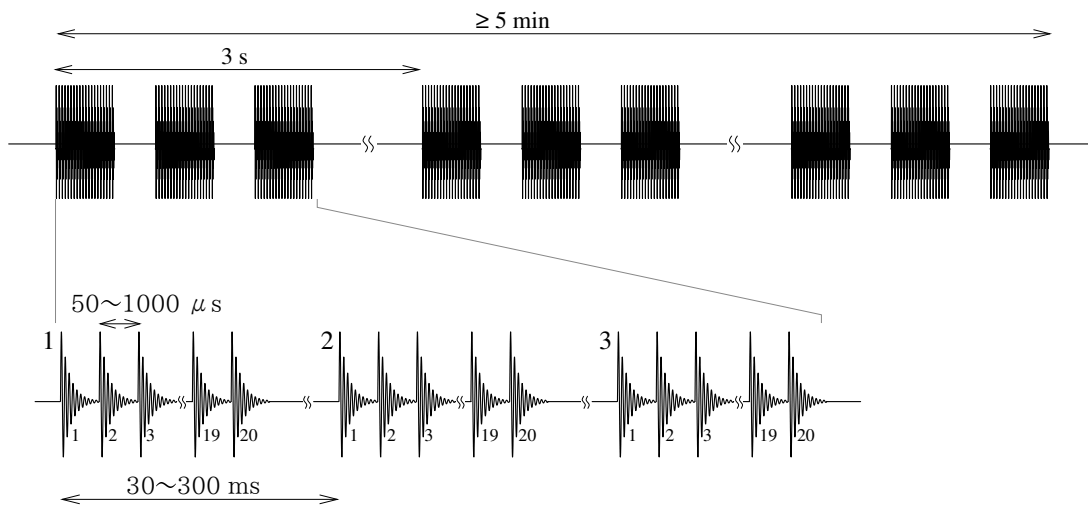


図 8: CS117 — 多重バースト試験

## 2 RS105 (放射サセプティビリティ、過渡電磁界)

RS105 は NEMP<sup>†11</sup>のような強力な電磁パルス (図9) の影響の評価を意図したもので、外部の電磁環境に曝される機器やサブシステムの筐体に適用される。<sup>†12</sup>

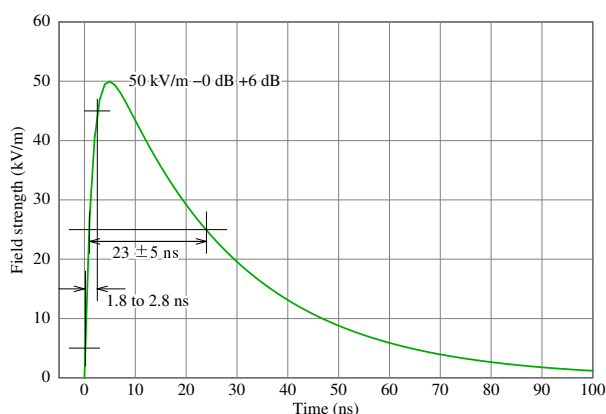


図 9: RS105 — 試験波形

試験は TEM セルや平行・プレート伝送線路などの放射システムにパルス発生器で発生させたパルスを印加して発生させた電磁パルスに EUT を曝すことで行なう (図11)。

規格では平行・プレート伝送線路の使用が示されているが、特に大型の設備ではしばしば triangular transmission line (図12) が用いられる。<sup>[3]</sup>

### 2.1 校正

1. EUT の前面が置かれる垂直面内の5点のグリッドの中央の点に B-dot センサ・プローブか D-dot センサ・プローブを置き、インテグレータ<sup>†13</sup>を通してオシロスコープに接続する (図10)。

<sup>†11</sup> NEMP (nuclear electromagnetic pulse, 核電磁パルス)、あるいは HEMP (high altitude electromagnetic pulse, 高高度 (核爆発) 電磁パルス) は高高度での核爆発によって引き起こされる激しい電磁パルスで、対象地域のネットワークや電子機器などをノックダウンするための攻撃手段として用いられる可能性がある。また、影響の範囲はより局所的なものとなるが、核を用いない EMP 兵器も開発されている。

<sup>†12</sup> パルスの形状は CS117 の Waveform 1 (表2) や IEC 61000-4-5 のサージ波形と似ているが、この電磁パルスの立ち上がり時間は 1.8~2.8 ns、パルス幅は 23 ± 5 ns であり、著しく早いことに留意されたい。

<sup>†13</sup> B-dot センサは磁界の、D-dot センサは電界の変化率を検出する。これらのセンサの出力の波形は磁界や電界の強さを微分したものとなるため、波形を再現するために積分することが必要となる。

2. 過渡パルス発生器の出力、放射システムへの入力間に高圧プローブを接続し、プローブをオシロスコープに接続する。
3. パルスを発生させ、ピーク振幅、立ち上がり時間、パルス幅の要求を満たすパルス電磁界が磁界か電界のプローブで測定されるように過渡パルス発生器を調整する。

波形のパラメータ (図9) は:

- 立ち上がり時間: 1.8~2.8 ns
  - 半値全幅パルス幅: 23 ns ± 5 ns
  - 各グリッド点での電界か磁界のピーク値: -0 dB~+6 dB
4. 他のグリッド点で上記の作業を繰り返す。
  5. 5つのグリッド点全てで同時に要求を満たす設定を特定する。

### 2.2 試験

1. EUT を放射システムのユーザブル・ボリューム (幅  $B$  の 1/2、長さ  $A$  の 1/2、高さ  $H$  の 1/3 の領域— 図11 参照) の範囲内に置く。

- その機器が実際の設置でグランド・プレーン上に置かれるならばグランド・プレーン上に置いて実際の設置と同様の形で接続し、さもなくば電磁界の歪みが最小限となるような絶縁材で保持する。

- EUT の向きは電磁界の最大の結合を模擬できるようにし、可能であれば直交する3つの向きで試験する。

- EUT の動作や監視のためのケーブルはケーブルへの電流や電圧の誘導が最小限となるようにする。

ケーブルは電界ベクトルと直交するように、また磁界ベクトルと直交するループ面積が最小となるようにする。平行平板のワーキング・ボリュームの外に出るケーブルは少なくとも高さの2倍の距離まで電界ベクトルと直交すべきである。

- 放射システムの下側のプレートは接地基準に接続する。



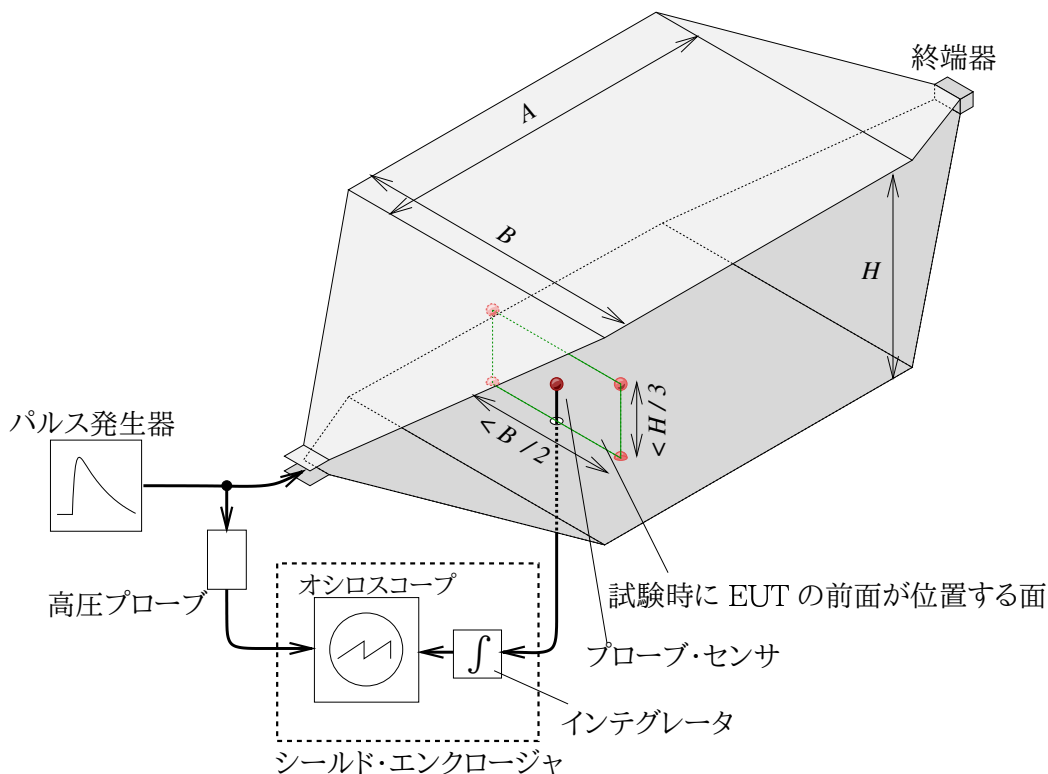


図 10: RS105 — 校正のためのセットアップの例

- 放射システムの上側のプレートは他の金属から少なくとも高さの 2 倍離す。
  - 放射システムが開放形の場合、負荷や信号源はシールドする。
  - 電源の保護のため、EUT の電源ラインの電源の近くに過渡電圧防護素子を取り付ける。
2. 事前に §2.1 のようにして決定された振幅の 10 % から始め、必要なレベルに達するまで、あるいは EUT が誤動作を生じるまでレベルを増加させる。
  3. サセプティビリティが確認された場合、その閾値を同定する。

## 2.3 データの提示

提示するデータには以下の情報を含める:

- ケーブルを含む、EUT の配置の写真;
- EUT の構成の詳細な記述;

- EUT のそれぞれの配置についての、ピーク値、立ち上がり時間、パルス幅を示すオシロスコープでの記録;
- 該当する場合、EUT の異常動作からの回復時間。

## 2.4 補足

- 試験時、放射システムには高電圧のパルスが印加され、放射システムが開放形の場合は周囲にも高レベルの電磁界が放射される。

感電を、また過剰な電磁界への曝露を防ぐため、シールド・ルーム内での試験の場合はシールド・ルームから全ての人を確実に排除して扉を閉じて<sup>†14</sup>、あるいは屋外での試験の場合は全ての人を安全な距離まで確実に遠ざけた上で試験を行なうべきである。<sup>[4]</sup>

- 試験時に放射システムの近くに電子機器が置かれている場合、試験で放射される高レベルの電磁界の影響で誤動作や損傷を生じる可能性がある。

<sup>†14</sup> 扉が開いた状態でパルスが出力されないようにインターロックされているべきである。

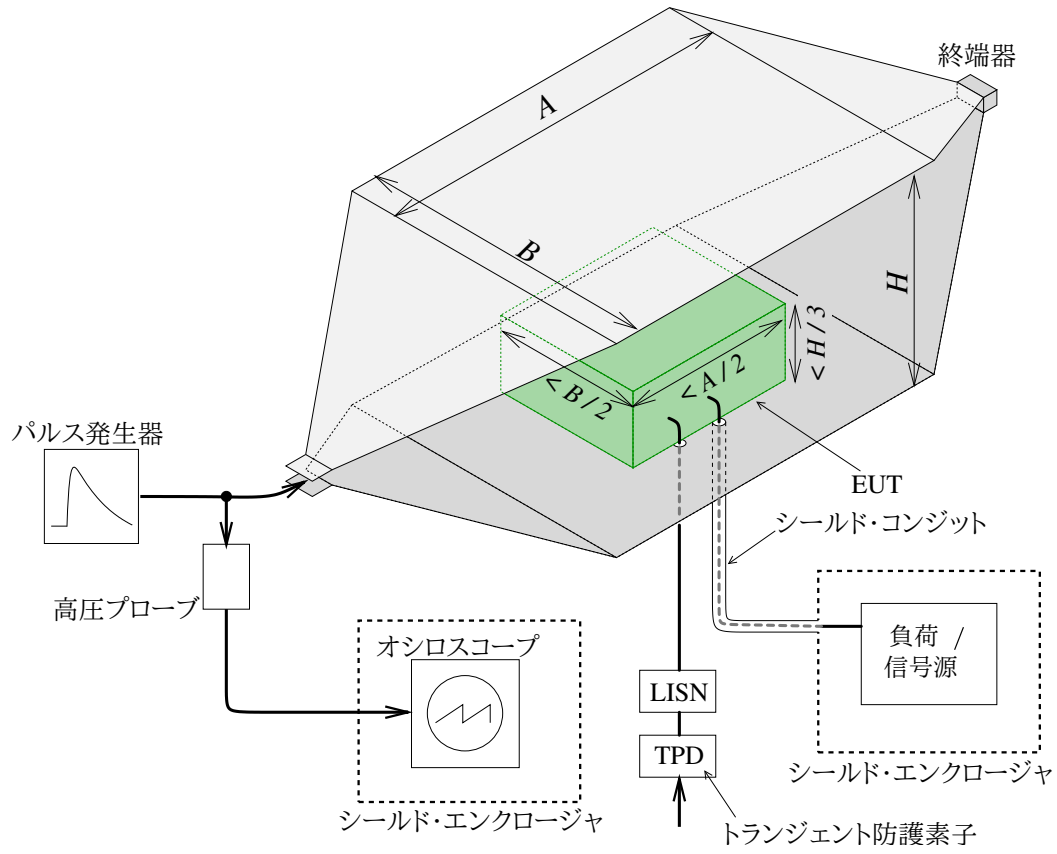


図 11: RS105 — 試験セットアップの例

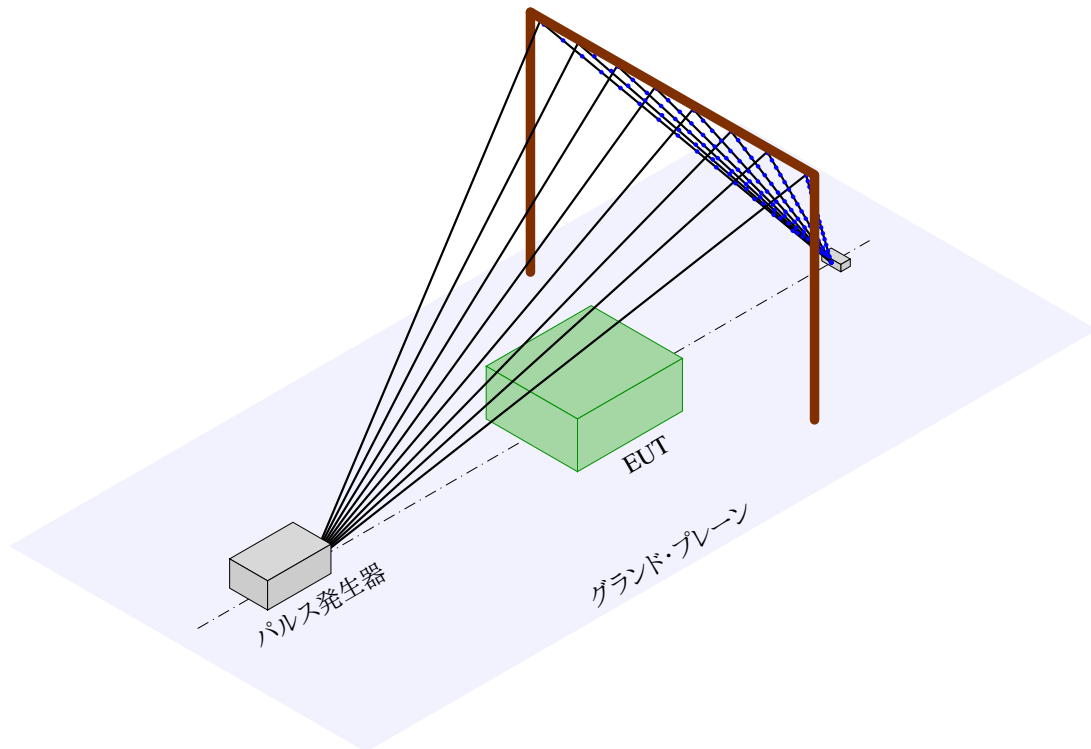


図 12: RS105 — Triangular transmission line

試験時、電子機器とそのケーブルは十分に遠ざけるか、あるいは図11で図示しているように適切にシールドすべきである。

### 3 参考資料

- [1] MIL-STD-461G, *Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment*, Department of Defense, 2015
- [2] MIL-STD-464C, *Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems*, Department of Defense, 2010
- [3] *NEMP Test Systems MIL-STD-461E & F RS105 @ 50 kV/m - System description*, montena technology sa, 2013,  
[https://www.montena.com/fileadmin/technology\\_tests/documents/system\\_descriptions/System\\_Description\\_NEMP\\_RS105\\_V18.pdf](https://www.montena.com/fileadmin/technology_tests/documents/system_descriptions/System_Description_NEMP_RS105_V18.pdf)
- [4] *Peak electric field in the vicinity of NEMP test installations and safety requirements (montena technical note TN17)*, montena technology sa, 2017,  
[http://www.montena.com/fileadmin/technology\\_tests/documents/technical\\_notes/TN17F\\_Safe\\_distance\\_NEMP.pdf](http://www.montena.com/fileadmin/technology_tests/documents/technical_notes/TN17F_Safe_distance_NEMP.pdf)
- [5a] 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, 2020,  
<https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [5b] 軍需機器の EMC — MIL-STD-461G の概要 — Part 2: 主なサセプティビリティ要求 (CS101, CS109, CS114, CS115, CS116, CS118, RS101, RS103) 株式会社 e・オータマ 佐藤, 2020,  
<https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [6] *What happens when lightning strikes an airplane?*, Edward J. Rupke, Scientific American, 2006,  
<https://www.scientificamerican.com/article/what-happens-when-lightni/>