航空用機器の EMC — DO-160G の概要

Part 3: 雷誘導トランジェント・サセプティビリティ、及び静電気放電

株式会社e・オータマ 佐藤智典

2020年11月30日

目 次

	概要													
2	雷誘	導トラ	ンジェント	、・サ1	ェプき	ティ	ビ	IJ÷	، ح	ſ				
	2.1	機器の	カテゴリ											
	2.2	基本的	なセット	アップ										
	2.3	ピン注	入試験.											
		2.3.1	校正 .											
			2.3.1.1	直接	注入	法								
			2.3.1.2	ケー	ブル	誘導	算法	÷ .						
			2.3.1.3	グラ	ンド	注フ	入法							
		2.3.2	試験.											
	2.4	ケーブ	ル・バン	ドル試	驗									
		2.4.1	ケーブル	誘導計	t験					÷		÷	Ċ	Ĵ
			2.4.1.1	検証						÷		÷	Ċ	Ĵ
			2.1.1.1	試驗	• •	• •	•	• •	•	•	·	•	•	•
		242	グラント	注入言	· · ·	• •	•	• •	•	•	·	•	•	•
		2.1.2	2421	检訂		• •	•	• •	•	•	•	·	•	•
			2.4.2.1 2/2.2.1	計驗	• •	• •	•	• •	•	•	•	•	·	•
	25	補兄	2.4.2.2	1-1-1-12	• •	• •	•	• •	•	·	·	•	·	•
	2.0	951	···· 油形の1	・・・・ べ ル の	い通信	÷	•	• •	•	·	•	•	·	•
		2.0.1	収拾のレ	シューション	いりの	±.	•	• •	•	•	•	·	·	•
		2.0.2	叫吸电机		ノレム书	χ.	•	• •	•	•	•	·	·	•
3	静雷	気放電	(ESD)											
-	3.1	ESD 4	発生器 .											
	3.2	試験												
		H. 1.2/1					·				'			·
4	参考	資料												

4 参考資料

概要 1

RTCA DO-160G^[1] は RTCA^{†1} が発行した航空 機搭載機器の環境条件や試験法を定める文書である。

RTCA は主に航空機や関連機器の製造業者や関 連機関などが加盟する非営利団体であり、FAA (米 国連邦航空局)の支援を受けており、また FAA の 諮問機関の1つとなってはいるものの、それが発行 した文書が直接法的な効力を持つわけではない。だ が、FAA が基準として DO-160G を受け入れる^[4]、 国土交通省航空局の「装備品等型式及び仕様承認に 係る一般方針」^[5] で DO-160 が参照されるなど、こ れは航空機搭載機器に対する基準として広く用いら れている。

また、RTCA は欧州で同様の活動を行なってい る EUROCAE^{†2} と連携しており、EUROCAE ED-14G は DO-160G と整合している。

本稿ではこの DO-160G の要求事項のうち、22章 の雷誘導トランジェント・サセプティビリティ、及び 25章の静電気放電の影響の要求について解説する。

なお、本稿はそ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 報は当該の規格そのもの^[1]や関連する公式な文書 を参照されたい。



^{†1} 旧称 Radio Technical Commission for Aeronautics; https://www.rtca.org/

^{†2} European Organisation for Civil Aviation Equipment; https://www.eurocae.net/



2 雷誘導トランジェント・サセプ ティビリティ

DO-160G の 22 章で述べられている雷誘導トラ ンジェント・サセプティビリティの要求は、雷の間 接的な影響によって配線上に生じるトランジェント (過渡妨害)の影響の評価を意図している。

ピン注入試験とケーブル・バンドル試験の2つの 試験があり、ピン注入試験 (§2.3) は主に耐損傷性 の評価を、またケーブル・バンドル試験 (§2.4) は主 に機器の機能への影響 (誤動作の起こしにくさ)の 評価を意図している。

雷の直接的な影響は DO-160G の 23 章で別途カ バーされ、この試験では考慮されない。^{†3}

この試験で用いられるトランジェントは 23 章の 試験で用いられるもののように激烈なものではない が、それでも人の感電による傷害や死をもたらす可 能性が、また絶縁の破壊や部品の破裂などに伴う事 故を引き起こす可能性が考えられるレベルのものと なるため、事故の防止のための適切な配慮が必要と なる。

2.1 機器のカテゴリ

適用する試験波形セットと試験レベルは図1のよ うな6文字のカテゴリ指定で表現される。

適用する試験波形は、想定される主な結合メカニ ズムとケーブルがシールドされているかどうかか ら、また試験レベルは想定される設置環境から決定 される。

機器やケーブルが機体の金属で覆われた部分に設 置される場合は開口の影響が支配的となるものと想 定され、波形セット A、C、E、G 及び J が適用さ れる。

これに対して、機器やケーブルがカーボン・ファ イバ複合材のような高抵抗率の部分の内側に設置さ れる場合は開口の影響に加えて機体の電気抵抗の影 響も顕著となる^{†4}と想定され、このような場合は波 形セット B、D、F、H、及び K が適用される。

標準的な試験法や試験レベルとの相違がある場 合、ピンやケーブル・バンドルによって異なる試験 法や試験レベルを適用する場合などはカテゴリ指 定では "Z"で示す。この場合、耐環境性評価記録 (environmental qualification form)^{†5}、及び/もし くは耐環境性評価記録報告書 (environmental qualification report) に、またおそらくは試験計画書に も、具体的な試験法や試験レベルを示すことが必要 となるだろう。

2.2 基本的なセットアップ

EUT はこのシリーズの Part 1^[6]の「基本的な セットアップ」で述べたようにセットアップする。

EUT はグランド・プレーン上に置く。EUT とグ ランド・プレーンとの接続には EUT の設計や設置 指示に含まれているもののみを用いる。

製造業者がそのように指示している場合、EUT は衝撃・振動アイソレータ (例えば防振ゴム) が組み 込まれた取付台^{†6}に固定し、取付台に接続ストラッ プが含まれていればそれをグランド・プレーンに接 続する。取付台に含まれていない接続ストラップを 試験セットアップで用いてはならない。

EUT の接地のための接地端子がある場合、設置 指示書で指定された長さ、あるいはその指定がない ならば 30 cm 程度の接地線でグランド・プレーン に接続する。

ケーブル・バンドル試験では、相互接続線、ケー ブル・バンドル (線の束)、RF 伝送線路は該当する 設置図に従う。ケーブルは航空機への設置の際と同 様の形で束ね、航空機への設置を代表するものとし てより高い位置が指定されない限り、ケーブル・バ ンドルの下端がグランド・プレーンから最小 50 mm となるようにする。これと異なる指定がない限り相 互接続線の長さは 3.3 m 以上とする。また、実際

^{†3} [10] によると、航空機は平均で 1000 飛行時間に 1 回程度 被雷し、2013 年には 54,900 件程の雷関連の事象が発生してい る。雷は稀な事象ではなく、従って航空機は飛行中に雷撃を受け ても安全が損なわれないことが求められる。機体の外部に取り 付けられる設備は雷の影響を直接受ける可能性があり、従ってそ の影響の考慮が必要となるが、多くの電子機器は金属の機体で 保護されており、そのようなものでは雷に伴う間接的な影響が 主な懸念となる。

^{†4} 雷に伴う電流が機体を流れた時、期待の部分間に顕著な電 位差が生じることが予期される。

^{†5} 環境試験がどのように行なわれたかを示すもので、DO-160G の Appendix A で述べられている。

^{†6} 航空機搭載機器は、保守を容易にするために、ラックに防 振ゴムなどで固定された取付台(トレー)に固定されることも多 く、また他の機器への配線が取付台に備えられたコネクタを介 して接続されることも多い。このような場合、取付台が機器の EMC に影響する可能性が予期されるため、実際の設置で使用 する取付台を含めて試験することが適切と考えられる。





1	良く保護された環境
2	ある程度保護された環境
3	ほどほどに保護された環境
4, 5	厳しい電磁環境
Z	その他の試験レベル

図 1: 雷誘導トランジェント — カテゴリ指定

の設置で非常に長いケーブルが使われるとしても、 試験でのケーブル長は 15 m 以下とすることが推奨 される。

機器の仕様でこれと異なる指定がない限り、EUT と LISN (このシリーズの Part 1^[6] 参照)のあいだ の電源リード (また、ローカル接地でない場合の電 源リターン線)の長さは 1 m 以下とする。ローカ ル接地 (1 m 以下の導体での機体への接続)の場合、 該当する設置図面などに従って電源リターン線をグ ランド・プレーンに直接接地して良い。

電源リードと電源リターン線が通常は他の配線と 束ねられる場合は分ける必要がある箇所まで束ねた ままとし、その他の場合は EUT の近くで他の配線 の束から分けて別に引く。

アンテナ・ケーブルは、ケーブルの特性インピー ダンスと等しい負荷、あるいは実際のアンテナの特 性を模擬するシールドされた疑似空中線で終端して 良い。

2.3 ピン注入試験

ピン注入試験では、主に雷からの誘導に伴うト ランジェントを受けた時の耐損傷性の評価のために EUT の端子にトランジェントを印加する。

試験法としては

- 直接注入法
- ケーブル誘導法
- グランド注入法

の3つが示されており、直接注入法は信号や電源の ピンの、ケーブル誘導法やグランド注入法は電源の ピンの試験のための使用が意図されている。

適用する試験波形は想定される主な結合メカニズ ムから、また試験レベルは想定される設置環境から 決定される。(表1,表2)。

波形セット	試験波形
A (開口結合)	3/3, 4/1
B (開口及び抵抗結合)	3/3, 5A/5A

表 1: 雷誘導トランジェント — ピン注入試験 — 波形 セット

2.3.1 校正

試験法に応じて §2.3.1.1~§2.3.1.3、また図3 ~図5のような構成で、出力 (スイッチとして示し ている)を開放とした状態での開放電圧波形とレベ ルが要求 (表2)を満たすようにトランジェント発 生器を設定し、その時の電圧波形のパラメータと レベル、及び発生器の設定を記録する。

さらに、その設定のままで、出力を短絡とした状 態で電流のレベルが要求を満たし、また短絡電流波 形の全体的な形状が維持されていることを確認し、 その時の電流波形のパラメータとレベルを記録する。

この測定は、試験で使用するそれぞれの試験波形 とレベル、また双方の極性について行なう。

開放電圧波形と異なり、短絡電流波形の形状は許 容幅に入らなくても良いが、その波形にできる限り 近付いものとなるべきである。

二重指数波形 (電流波形 1、及び 5A) について は、規定よりも短い立ち上がり時間、あるいは長い 持続時間の短絡電流波形は許容できる。持続時間が 規定値 –20 % よりも短い場合、その時間での電流 のレベルが規定されたピーク電流の 50 % となるよ うに試験レベルを上げることが推奨される。また、 立ち上がり時間が規定値 +20 % よりも遅い場合、 その時間で規定されたピーク電流に達するように試 験レベルを上げることが推奨される (図 2)。



図 2: 雷誘導トランジェント — ピン注入試験 — 電流波 形による試験レベルの補正 (電流波形 1)





振幅の許容差は +10 %, -0 %

表 2: 雷誘導トランジェント — ピン注入試験 — 発生器の設定

2.3.1.1 直接注入法

図3のように、トランジェント発生器の出力を適切なパワー・ブロッキング・デバイスを介して接続 する。

パワーブロッキング・デバイスは、試験対象のピンに現れる電圧、すなわち試験時に用いられる電源 の電圧や EUT の信号ピンに現れる電圧を阻止しな がら試験で印加されるトランジェントを通過させら れるようなもので、典型的には、

- 波形3 コンデンサ^{†7}
- 波形 4、及び 5 無極性トランジェント・サ プレッサ (バリスタなど)^{†8}

を用いることができる。

^{†7} コンデンサは、試験対象のピンに現れることが予期される 電圧を確実に阻止できる絶縁性能、印加されるトランジェント を通過させられる静電容量の、そのトランジェントに耐えられ るであろうものを選択する。波形 3 のトランジェント発生器の 実効出力インピーダンス (開放回路電圧と短絡回路電流の大きさ の比率) は 25 Ω であるが、0.1 μ F のコンデンサで 1 MHz で 1.6 Ω (25 Ω の 6.4 %) 程度、0.33 μ F のコンデンサで 1 MHz で 0.5 Ω (25 Ω の 2 %) 程度のリアクタンスとなり、例えばこ の程度の容量のクラス Y2 のコンデンサが適当かも知れない。

^{†8} このトランジェント・サプレッサは、電源電圧を阻止し、か つ印加されるトランジェントをできる限りそのまま通過させら れるように、電源電圧のピークで導通しないものでなければな らず、かつ印加されるトランジェントの電圧よりも充分に低い電 圧で導通することが望ましい。だが、電源電圧が高く、試験レベ ルが低い場合は特に、所望の波形の達成はかなり困難かも知れ ない。



→ 無極性抑制デバイス (バリスタなど) 図 3: 雷誘導トランジェント — ピン注入試験 (直接注入 法) — 校正セットアップ

2.3.1.2 ケーブル誘導法

図4のように、電源リードに結合用変圧器を取り 付け、トランジェント発生器の出力を結合用変圧器 を介して結合させられるようにする。

電源の出力には、印加されたトランジェントの経 路となるバイパス回路として、適切な特性のコンデ



ンサを並列に接続する。^{†9†10}





2.3.1.3 グランド注入法

図5のように、出力をフローティングとした電源 のグランド線に割り込むような形でトランジェント 発生器を接続することで、電源ラインにトランジェ ントを重畳させる。

電源の出力には、印加されたトランジェントの 経路となるバイパス回路として、ケーブル誘導法 (§2.3.1.2)と同様に適切な特性のコンデンサを接続 する。

この試験法では、ケーブル誘導法 (§2.3.1.2, 図4) と異なり、試験時には EUT の電源電流もそのまま トランジェント発生器を通過することに注意が必要 である。

2.3.2 試験

それぞれのピンに以下のようにトランジェントを 印加し、損傷を生じないことを確認する:



図 5: 雷誘導トランジェント — ピン注入試験 (電源ピン、 グランド注入法) — 校正セットアップ

 試験法に応じて図6~図8のような構成で、試 験対象のピンと電圧の校正が行なわれたポイン トを短いワイヤ (5 cm 以内)で接続する。
 実際の設置でシグナル・グランドが機器の外側

実际の設置でジックル・シフントが機器の外換 で接地される場合、試験でも接地する。^{†11}

2. EUT の電源を入れる。

通常は周辺機器は接続せず、従って EUT は完 全な動作状態とはならないかも知れないが、こ れは差し支えない。

但し、ポートの状態 (例えばデジタル出力ポー トがハイとローのいずれとなっているか) が試 験の結果に影響することが予期されるような場 合、試験の結果が厳しくなるであろう状態で、 あるいはそれぞれの状態での試験を考慮すべき かも知れず、試験時にそのような状態とするた めには特別なソフトウェアが必要となるかも知 れない。

- 3. 校正 (§2.3.1) で同定された設定で、1 分以下の 間隔で、トランジェントを 10 回印加する。
- さらに、トランジェントの極性を逆にして、同様に試験を行なう。

^{†9} 例えば 1600 A の電流波形 5A を流した時にコンデンサの 両端に現れる電圧を充分に抑えようとすると 10 000 μF 程度以 上のコンデンサ (これでもコンデンサの両端に ±20 V 程度の電 圧が現れるかも知れない) が必要となるかも知れないが、電源が AC の場合はこのような大容量のコンデンサを用いることはで きない。従って、このようなトランジェントに対してはコンデ ンサと並列に接続したトランジェント・サプレッサをトランジェ ントの主な経路として用いることになりそうである。トランジェ ント・サプレッサについては †8も参照。

^{†10} 適切なバイパス回路を入れた場合でも電源に相当の電流が 流れ込む可能性が予期され、これが問題となる可能性がある場 合、電源の出力へのインダクタやフィルタの追加などの考慮も 必要となるかも知れない。

^{†11} 例えばそのポートがフォト・カプラなどで絶縁されている ような場合、フローティングの状態ではトランジェントに問題 なく耐え、だがそのポートの片側のピンを接地した状態でもう 一方のピンにトランジェントを印加した場合はフォト・カプラが 焼損するかも知れない。従って、このようなポートをフローティ ングの状態のみで試験したのではトランジェントへの耐性を適 切に評価できそうにない。状況によっては、機器の外側で接地 されるかも知れないピンを接地した状態と接地しない状態の双 方での試験を考慮する価値もあるかも知れない。

試験中の電圧や電流の波形が校正時と異なるのは 異常ではないが、試験中は電圧と電流の波形に予期 しない変化が生じないかどうかを監視し、そのよう な変化が見られた場合は適切な対応を行なう。^{†12}

保護と動作に関して同一の回路設計の4つ以上の 回路のグループは、各グループについて3つの代表 的なピンを試験すれば良い。

試験電圧波形が校正での開放電圧波形の許容差内 にあるならば、複数のピンを同時に試験しても良い。

導体の遠端と機体のあいだのリモート・ロード・ インピーダンス特性が規定されており、またその耐 電圧がトランジェント発生器の開放回路電圧に耐え る (遠端負荷にトランジェントを印加した時に顕著 な電流が流れない) ものである場合、図6のように そのインピーダンスに相当する無誘導抵抗を挿入し て試験することができる。波形3ではこの抵抗は 75 Ω 以下とする。この方法を用いる場合、対応す る波形セット指定子 (§2.1) は Z とし、耐環境性評 価記録 (environmental qualification form) や試験 報告書にリモート・ロード・インピーダンスとその 耐電圧も記載する。

通電状態での電源ピンを直接注入法で試験する場 合、図6のように、電源はトランジェント・ブロッ キング・デバイスを介して給電し、その電源ピンに 電圧の校正が行なわれたポイントから短いワイヤで 接続する。トランジェント・ブロッキング・デバイ スは印加されたトランジェントの電源側への漏れを 阻止しながら電源を通過させるもので、具体的にど のようなものを使用すべきかは規格では記載されて いないが、適切な特性のインダクタをこの目的で使 用できる。^{†13}

トランジェント・ブロッキング・デバイスは電源 をトランジェントからある程度保護するが、それだ けでは充分な保護を与えられないかも知れない。試 験で印加されるトランジェントが電源に悪影響を与 えることが懸念される場合、インダクタの電源の側 への電源に見合ったコンデンサやトランジェント・ サプレッサ (バリスタなど) の追加を考慮しても良 いだろう。

AC 電源にトランジェントを印加する場合、AC 電源波形のピークに同期させるべきである。







ケーブル誘導法) — 試験セットアップ

2.4 ケーブル・バンドル試験

ケーブル・バンドル試験は、主に相互接続ケーブ ル・バンドルが雷からの誘導に伴うトランジェント を受けた時の機器の機能への影響(誤動作の起こし にくさ)の評価を意図したものである。

^{†12} 例えば、波形の途中での電圧の急落や電流の急上昇は絶縁 破壊や降伏の発生を示唆する。このような場合、それがトラン ジェント保護回路の正常な応答によるものでない場合、その後 で機器が正常に動作したとしても、異常があったものと考える ことが必要となるかも知れない。

^{†13} トランジェント・ブロッキング・デバイスは、印加された トランジェントの一部が電源側に漏れて EUT 側に注入される トランジェントのレベルが低下することを防ぐとともに、電源 をトランジェントからある程度保護する。トランジェントの阻 止の効果は、例えば校正ポイントにトランジェント・ブロッキン グ・デバイスを接続してその電源側を接地した状態での電圧波 形をトランジェント・ブロッキング・デバイスを接続していない 時の電圧波形と比較することなどで確認できるであろう。





図 8: 雷誘導トランジェント — ピン注入試験 (電源ピン、 グランド注入法) — 試験セットアップ

試験法としては、ケーブル誘導試験 (§2.4.1)^{†14}と グランド注入試験 (§2.4.2) の2つが定められている。

2.4.1 ケーブル誘導試験

2.4.1.1 検証

トランジェント発生器の検証は以下のように行 なう:

1. 図9のように接続する。

校 正 ルー プは、低イ ンピーダンスの、 表4~表6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4~表6)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) $^{+15}$ を発生でき る必要はないが、制限レベルを発生できるので 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して おくと良い。^{†16}

 多重ストローク(表5)や多重バースト(表6)の パラメータも確認する。



図 9: 雷誘導トランジェント — ケーブル・バンドル試験 (ケーブル誘導試験) — 発生器の検証のセットアップ

2.4.1.2 試験

基本的には、それぞれのコネクタからのバンドル の全てのワイヤを一括で試験する。

電源線がバンドルから分けて引かれる場合は、そ れは別に試験する。この場合、注入する電流は対応 するピン注入試験の(波形1と2についてはピン注 入試験での波形4/1の)短絡回路電流(表2)を超え る必要はない。

ケーブルのシールドは通常はそのままの状態とす る。シールドを除いた状態で試験する場合、ケーブ ル・バンドル試験波形セットの波形セット指定子は Zとし、試験レベル指定子は芯線に注入される実際 のレベルを反映する。

単一ストローク試験を多重ストローク試験と組み 合わせても良く、この場合、多重ストローク試験の 第1ストロークの試験レベル(表5)は単一ストロー クの試験レベル(表4)で置き換える。

波形 1、5A、及び 6 は試験レベルは電流 (I_T) 、 制限レベルは電圧 (V_L) で規定されており、波形 2、 3、及び 4 は試験レベルは電圧 (V_T) 、制限レベルは 電流 (I_L) で規定されている。

^{†14} ケーブル誘導試験は MIL-STD-461G の CS117^{[2][7]} と類 似している。

^{†15} 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。

⁺¹⁶ 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 る場合がある。

トランジェント発生器の検証 (§2.4.1.1) では試験 レベルとその波形のパラメータが許容範囲に入るこ とが確認されていなければならない。但し、試験時 に観測された波形のピーク値とその他のパラメータ が該当する許容範囲に入るならば、事前の検証は不 要となる。

試験対象となるそれぞれのバンドルに対する試験 は次のように行なう:

- 1. EUT は §2.2で述べたように、また図 10に例示 するようにセットアップし、電源を入れて完全 に動作させる。
 - LISN が 10 kHz よりも上で自己共振 する^{†17}場合、図11で示すように、AC 電 源の場合は各電源導体と接地のあいだに 10 µF の、DC 電源の場合は電源導体間に 28 000 µF 以上^{†18}のコンデンサを接続す る (図 11)。^{†19}

使用するコンデンサは、電源に見合った、 試験の際に受けるかも知れないトランジェ ントに耐えられるものを選択すべきであ る。例えば AC 電源の場合、クラス X1 か X2 の 10 μ F のコンデンサが適当かも 知れない。

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 LISN と電源のあいだ に保護 (例えばインダクタやトランジェン ト・サプレッサ) を追加することも考慮し た方が良いかも知れない。

 EUT から見た周辺機器のインピーダンス は電圧や電流の分布に、従って試験の結 果に直接影響するため、実際の使用にお けるインピーダンスを適切に代表するよ うにする。 周辺機器を模擬する場合、トランジェン ト印加時のトランジェント防護素子の応 答などによって生じるかも知れない非線 型な応答も適切に模擬する。

- 図 10に示すように、妨害の注入を行なうバンドルの EUT から 5~15 cm の位置 (コネクタのバックシェルの長さが 15 cm 以上ある場合などはそのできる限り近く)に電流モニタ変圧器(電流プローブ)を、電流モニタ変圧器から5~50 cm の位置に注入変圧器を取り付ける。
- トランジェント発生器を所定のトランジェント 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) に達するまでトランジェント発生器の振幅を増 加させる。

試験レベル $(V_T \text{ br } I_T)$ よりも前に制限レベル $(I_L \text{ br } V_L)$ に達した場合、試験波形に応じて、

電流波形1

その検証に際しての電圧波形の立ち上が り時間が波形1の規定よりも短く、かつ 持続時間が波形2の規定よりも長かった ならばその試験は許容できる。 さもなくば電圧波形2での試験を実施し、 対応する波形セット指定子はZとする。

- 電圧波形2
 検証に際して電流波形1の発生が確認されていたならばその試験は許容できる。
 さもなくば電流波形1での試験を実施し、
 対応する波形セット指定子はZとする。
- 電圧波形 3

その試験は許容できる。

電圧波形 4

検証に際しての電流波形の立ち上がり時間と持続時間が電圧波形のそれよりも長かったならばその試験は許容できる。 さもなくば電流波形5Aでの試験を実施し、対応する波形セット指定子はZとする。

■ 電流波形 5A

検証に際しての電圧波形の立ち上がり時 間が波形 5 のそれよりも短いが波形 4 の

^{†17} 5 μ H LISN は、入力段のコンデンサが 1 μ F (CISPR 25 や ISO 11452-*^[9] で用いられるもの)の場合は約 70 kHz、入 力段のコンデンサが 2 μ F (CISPR 16-1-2 で規定された 50 Ω / 5 μ H + 1 Ω V-network での最小値)の場合は約 50 kHz で 共振を生じる。

^{†18} 直流安定化電源の出力に大容量のコンデンサを接続すると 制御が不安定になったり損傷を生じたりする場合もあるため、使 用する電源がそのコンデンサの接続で問題を起こさないかどう かを事前に確認した方が良いだろう。

^{†19} 電源を切った後もコンデンサに相当のレベルの電荷が残るこ とがあるので、感電やその他の事故の防止のため、適切な配慮を 講じるべきである。10 μ F の場合はコンデンサと並列に 100 kΩ 程度以下のブリーダー抵抗を接続すれば数秒以内に安全な電圧 に低下するであろうが、28 000 μ F の場合は 1 kΩ の抵抗を並 列に接続したとしても安全な電圧まで低下するまでに 1 分前後 の時間を要するかも知れない。

波形セット	試験タイプ	試験波形番号†
C (シールドなし、開口結合)	単一ストローク (表4)	2, 3
D (シールドなし、開口および抵抗結合)	単一ストローク (表4)	2, 3, 4
E (シールドあり、開口結合)	単一ストローク (表4)	1, 3
F (シールドあり、開口および抵抗結合)	単一ストローク (表4)	3, 5A
G (シールドなし、開口結合)	単一ストローク (表4)	2, 3
	多重ストローク (表5)	2, 3
H (シールドなし、開口および抵抗結合)	単一ストローク (表4)	2, 3, 4
	多重ストローク (表5)	2, 3, 4
	単一ストローク (表4)	1, 3
	多重ストローク (表5)	1, 3
K (シールドあり、開口および抵抗結合)	単一ストローク (表4)	3, 5A
	多重ストローク (表5)	3, 5A
L	多重バースト (表6)	3
M	多重バースト(表6)	6

†波形 2, 3, 4 は電圧、その他は電流

表 3: 雷誘導トランジェント — ケーブル・バンドル試験 — 試験要求



図 10: 雷誘導トランジェント — ケーブル・バンドル試験 (ケーブル誘導試験) — 試験セットアップの例



表 4: 雷誘導トランジェント — ケーブル・バンドル試験 — 単ーストローク試験の試験レベルと制限レベル 11



			1 2 2 4	e / e 沿4%	- / - 2142	
表		$V_L (\mathrm{V}) / I_T (\mathrm{A})$	$egin{array}{l} V_T \left(\mathrm{V} ight) / I_L \left(\mathrm{A} ight) \ \end{array}$	$V_T \left(\mathrm{V} ight) / I_L \left(\mathrm{A} ight)$	V_{T} (V) / I_{L} (A)	V_L (V) / I_T (A)
5: 雷訪			100%	100 %	100%	100%
秀導トラ		40 cs	An a.	50% - 載大のビークの 25~75 % 50% -	Current Waveform 1	Waveform 5A
レジェ		- Voltage Waveform 2	20.00 Voltage Waveform 2	0 <u>1 2 3 4 5 000000000000000000000000000000000</u>	50 %	50 % Voltaee Waxeform 4
ント -		2001 2015 2015 2015 2015 2015 2015 2015	2017 2017 2017 2017 2017 2017 2017 2017	Voltage Waveform 3 Current Waveform 3	0 12 Voltage Waveform 4	511 511 511 511 511 511
— ケ	イベノ	-035-080 -035-080	anti-anti-	$f=1~\mathrm{MHz},10~\mathrm{MHz}~(\pm20~\%)$	1 1 .9 1 69	730 1700 99 90
「 -フ	第1ストローク	50 / 50	50 / 50	$100 \ / \ 20$	$25 \ / \ 50$	$20 \ / \ 60$
ブル	後続ストローク	$25 \ / \ 25$	$25 \ / \ 25$	$50 \ / \ 10$	$12.5 \ / \ 25$	10 / 30
・バ	2 第1ストローク	$125 \;/\; 125$	$125 \ / \ 125$	$250 \ / \ 50$	$62.5 \ / \ 125$	$50 \ / \ 160$
ンド	後続ストローク	$62.5\ /\ 62.5$	$62.5 \;/\; 62.5$	$125 \ / \ 25$	31.25~/~62.5	$25 \ / \ 80$
い。 ル記	8 第1ストローク	$300 \ / \ 300$	300 / 300	$600 \ / \ 120$	$150 \ / \ 300$	$120 \ / \ 400$
、験	後続ストローク	$150 \ / \ 150$	$150 \ / \ 150$	$300 \ / \ 60$	$75 \ / \ 150$	60 / 200
⁷	1 第1ストローク	750 / 750	750 / 750	$1500 \ / \ 300$	$375 \;/\; 750$	$300 \ / \ 800$
多重	後続ストローク	$375 \ / \ 375$	375 / 375	750 / 150	$187.5 \;/\; 375$	$150 \ / \ 400$
[…] スト	5 第1ストローク	$1600 \ / \ 1600$	$1600 \ / \ 1600$	$3200 \;/\; 640$	$800 \ / \ 1600$	$640 \ / \ 2000$
ц – ц	後続ストローク	$800 \ / \ 800$	800 / 800	$1600 \ / \ 320$	$400 \ / \ 800$	$320 \ / \ 1000$
艹 - ク言	振幅の許容差は第1ス	トロークは+20%,-0%、	後続ストロークは +50 %, -0 %			
式験の			≥ 10⊡			
の試験		_ _	≤ 5 min		-	
食レベ						
いと				~		
制限		:				
レベノ		·) [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1]	ストローク後続ストローク			
V		\geq	$10\sim 200 \text{ ms}$	-		
		<u> </u>				
		. \ 	∠≫≤1.5 s) /		







表 6: 雷誘導トランジェント — ケーブル・バンドル試験 — 多重バースト試験の試験レベルと制限レベル

それよりも短くないならばその試験は許 容できる。

さもなくば電圧波形 4 での試験を実施し、 対応する波形セット指定子は Z とする。 機体の設計や配線の引き回しによっては 波形 5B (波形 5A と似ているが、立ち上 がり時間が 50 μ s ± 20 %、持続時間が 500 μ s ± 20 % となる)のようなより長い 持続時間のトランジェントでの試験も考 慮すべきかも知れない。 電流波形 6

トランジェント発生器の開放回路電圧と 短絡回路電流の比率が 15 Ω 未満であれ ばその試験は許容できる。

さもなくば波形 3 多重バースト試験を行 なう。^{†20}

 $^{^{\}dagger 20}$ 電流波形 6 は低インピーダンスのケーブル・バンドルの多 重バースト試験のみに適用される (図1,表6)。電流での試験レ ベル I_T よりも先に電圧の制限レベル V_L に達したならば、お そらくそのケーブル・バンドルは低インピーダンスとは言い難 いだろう。

DC電源、非ローカル接地



DC電源、ローカル接地



AC電源、非ローカル接地



AC電源、ローカル接地



図 11: 雷誘導トランジェント — ケーブル・バンドル試 験 — コンデンサの接続

 4. 単一ストローク試験では、トランジェントを1 分以下の間隔で10回以上印加する(表4)。

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 (表5)。^{†21}

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 (表6)。

5. 過渡妨害の極性を変えて同様の作業を繰り返す。

2.4.2 グランド注入試験

グランド注入試験は単一ストローク試験と多重ス トローク試験に適用可能で、波形4と5Aについて 推奨され、波形1と2にも適用できる。

2.4.2.1 検証

図 12のように接続し、ケーブル誘導試験での波形 の検証 (§2.4.1.1) と同様に波形の検証を行なう。



図 12: 雷誘導トランジェント — ケーブル・バンドル試 験 (グランド注入試験) — 発生器の検証のセットアップ

2.4.2.2 試験

基本的にはケーブル誘導試験 (§2.4.1.2) の場合と 同様に、だが図 13に例示するように、以下のように セットアップする:

- EUT はグランド・プレーン上に、だがグランド・プレーンから絶縁して配置する:
 - EUT はグランド・プレーン上に、だが
 EUT の筐体 (あるいは取付台) が導電性の
 場合は非導電性の台やシートの上に置く;
 - EUT や取付台とグランド・プレーンのあいだの接地線を切り離す;
 - ローカル接地の場合、電源リターン線は グランド・プレーンではなく EUT の接地 ポイントに接続する。
- 必要に応じて複数の電流モニタ変圧器を用い、 ケーブル・バンドル全ての電流を測定できるようにする。
- トランジェント発生器の出力線を、EUTの筐体とグランド・プレーンのあいだに妨害を印加するように接続する。

^{†21} 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 (図 19)。後続雷撃の波頭長 (立ち上がり 時間) も第 1 雷撃のそれよりもかなり短くなる^{†22} が、この試験 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 はこの試験では模擬されていない。

^{†22} 例えば IEC 62305 では、第 1 正極性雷撃は波頭長 10 μ s、 波尾長 350 μ s、後続雷撃は波頭長 0.25 μ s、波尾長 100 μ s と いうパラメータが示されている。





図 13: 雷誘導トランジェント -- ケーブル・バンドル試験 (グランド注入試験) -- 試験セットアップの例

• それと同じポイントに電圧プローブを接続する。

このように接続した状態で EUT の電源を入れて 動作させ、ケーブル誘導試験 (§2.4.1.2) の場合と同 様に試験を行なう。

2.5 補足

2.5.1 波形のレベルの測定

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 14)。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。^{†23}



図 14: 雷誘導トランジェント — 過渡妨害の振幅の測定

電流の測定では電流モニタ変圧器 (電流プローブ) が必要となるが、この電流モニタ変圧器は測定する 電流波形に応じて適切な周波数範囲で平坦な応答を 持つものでなければならない。

^{†23} 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期される。DO-160G の User's Guide Appendix 22 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。

例えば、電流波形 5A の場合は下側のカットオフ 周波数が 20 Hz 程度以下、上側のカットオフ周波 数が 200 kHz 程度以上の、また電流波形 6 の場合 は下側のカットオフ周波数が 500 Hz 程度以下、上 側のカットオフ周波数が 5 MHz 程度以上の電流モ ニタ変圧器が必要となりそうである (図 15, 図 16)。

電流モニタ変圧器に流れる電流が大きいため、電 流モニタ変圧器の電流容量や飽和限界などの特性に も注意が必要となる。



図 15: 雷誘導トランジェント — 電流波形 5A の測定への電流モニタ変圧器の周波数応答の影響



図 16: 雷誘導トランジェント — 電流波形 6 の測定への 電流モニタ変圧器の周波数応答の影響

2.5.2 試験電流波形の比較

参考のため、ケーブル・バンドル試験での単一ス トローク試験電流波形(試験レベル5)を比較したも のを図17に、また

• ここで述べた試験の中で最も電流が大きい、

ケーブル・バンドル単一ストローク試験、電 流波形 5A、試験レベル 5 の試験波形 (表 4)

- DO-160Gの23章で述べられている、雷の直接的な影響に対する試験のうち、高電流物理損傷試験のコンポーネントA(第1帰還雷撃)の試験波形
- IEC 61000-4-5^[8] の 8/20 μs 2 kA 短絡電流 波形

の電流波形を対比したものを図18に示す。



図 17: 雷誘導トランジェント — ケーブル・バンドル試 験 単一ストローク試験電流波形 (試験レベル 5) の比較



図 18: 雷誘導トランジェント — 他の試験の試験電流波 形との比較

3 静電気放電 (ESD)

DO-160G の 25 章で述べられている静電気放電 (ESD)の影響に関する要求は、機器の使用に際して 受けるかも知れない人体からの ESD の機器の動作 への影響の評価を意図している。



10~100 ms 2~300 ms 図 19: 多重ストローク試験 (表 5) で模擬される多重雷の イメージ

3.1 ESD 発生器

試験は IEC 61000-4-2^{[5][8]} や MIL-STD-461^{[2][7]} で用いられるものと同様の 150 pF / 330 Ω の ESD 発生器を用いて行なう (図 20)。



ESD 発生器はピークが $\pm (15000 \text{ V} + 10 \%) - 0 \%$)のパルスを発生させられること^{†24}を校正で確認し、その際の設定を記録する。

3.2 試験

試験は次のように行なう:

 EUT はこのシリーズの Part 1^[6]の「基本的な セットアップ」で述べたように、また 図 21に 例示するようにセットアップし、電源を入れて 動作させる。

EUT の試験モードは、該当する場合、EUT の 全ての通常の動作モードを働かせるように選択 されたソフトウェアを含まなければならない。 • ESD は通常の運用や保守に際してアクセスで きる箇所に印加する。

印加箇所の検討には、操作部やキーボードの任 意の導電性や非導電性のポイント、また人が触 れるその他の任意のポイント、例えばスイッチ、 ノブ、ボタン、表示器、LED、継ぎ目、スロッ ト、グリル、コネクタのシェル、その他のアク セス可能な領域を含める。

選択された印加箇所で放電が生じない場合、例 えば印加箇所として選択された継ぎ目やスロッ トに沿った複数の点で、あるいは印加箇所とし て選択されたボタンの全周で放電を試みるな ど、その周辺で放電箇所を探す。

 先端の丸い気中放電用の電極を用い、ESD 発 生器を±(15000 V^{+10%})のパルスを発生させ られることが校正で確認された設定とし、選択 されたそれぞれの印加箇所にプラスで10回、 マイナスで10回の印加を行なう。

それぞれの放電は、EUT から離れた位置で放 電スイッチを閉じた後に、電極が印加箇所に触 れるか放電が発生するまで、人の手の接近と同 程度の速度 (0.3 m/s 程度)^{†25}で印加箇所に電 極を近付けることで発生させる。

放電の印加に際して、ESD 発生器は放電を印 加する面に対して垂直とする。放電リターン・ ケーブルはグランド・プレーンに接続し、EUT やその配線から 0.2 m 以上離す。

この規格では ESD の印加の前後の除電についての言及はないが、印加箇所に電荷が残る可能性がある場合、放電と放電のあいだに、例えば、1 MΩの抵抗の付いた除電用のリードかブラシ、あるいはイオナイザ^{†26}を用いて、あるいは単に電荷が消散するのに必要な時間だけ待つことで、印加箇所に残った電荷を除去することが必要となるかも知れない。



^{†24} 同様の ESD 発生器を用いる多くの規格と異なり、放電電 流波形ではなく電圧波形の確認が必要となる。

^{†25} IEC 61000-4-2:2008^{[5][8]} では電極が EUT に当たるまで できる限り早く、MIL-STD-461G^{[2][7]} では 0.3 m/s よりも遅 い速度で近付けるように規定されており、この規定はそれらと は相違している。なお、それらの規格ではこの試験法は非導電 性の箇所に対してのみ適用される (導電性の箇所は接触放電で試 験する)のに対して、この規格では導電性か非導電性かに関わら ずこの方法 (気中放電)が用いられる。

^{†26} イオナ^イザの効果は除電したい箇所にどれだけのイオンが 到達するかに依存し、イオナイザの能力、配置、試験対象品の構 造などによっては除電に相当の時間を要する場合もある。



図 21: 静電気放電試験のセットアップの例

4 参考資料

- RTCA DO-160G, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, RTCA, Inc., 2010
- [2] MIL-STD-461G, Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, Department of Defense, 2015
- [3] FAA Advisory Circulars AC 21-16G, RTCA Document DO-160 versions D, E and F, "Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment",

https://www.faa.gov/documentLibrary/media /Advisory_Circular/AC_21-16G.pdf

[4] 装備品等型式及び仕様承認に係る一般方針,平成17年4月26日制定,平成23年6月30日一部改正(国空機第282号),国土交通省航空局安全部航空機安全課長

http://www.mlit.go.jp/notice/noticedata/pdf
/201107/00005485.pdf

- [5] IEC 61000-4-2:2008, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test
- [6] 航空用機器の EMC DO-160G の概要,株式 会社 e・オータマ 佐藤, 2020,

https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html

- Part 1: 無線周波サセプティビリティ、及び エミッション
- Part 2: 電圧スパイク、音声周波伝導サセプ ティビリティ、及び誘導信号サセプティビリ ティ
- [7] 軍需機器の EMC MIL-STD-461G の概要, 株 式会社 e・オータマ 佐藤, 2020,

https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html

- Part 1: 主なエミッション要求 (CE101, CE102, RE101, RE102)
- Part 2: 主なサセプティビリティ要求 (CS101, CS109, CS114, CS115, CS116, CS118, RS101, RS103)



- 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)
- Part 4: 無線機器特有の試験 (CE106, RE103, CS103, CS104, CS105)
- [8] IEC 61000-4 シリーズ イミュニティ試験規格の 概要,株式会社 e・オータマ 佐藤, 2018,

https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html

[9] ISO 11452 シリーズの概要,株式会社 e・オータ マ 佐藤, 2016,

https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html

[10] Avionics Indirect Lightning, Jay Patel (HV TECHNOLOGIES, Inc.), 2016,

http://site.ieee.org/rockrivervalley/files/2016
/03/D0160-S22-Presentation.pdf

© 2020 e-OHTAMA, LTD.

All rights reserved.

免責条項 — 当社ならびに著者は、この文書の情報に関して細心 の注意を払っておりますが、その正確性、有用性、完全性、その 利用に起因する損害等に関し、一切の責任を負いません。