

航空用機器の EMC — DO-160G の概要

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

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2020 年 11 月 10 日

目次

1	概要	1
2	電圧スパイク	2
2.1	機器のカテゴリ	2
2.2	試験波形、及び試験レベル	2
2.3	試験	2
3	音声周波伝導サセプティビリティ	3
3.1	機器のカテゴリ	3
3.2	試験レベル	4
3.2.1	DC 電源	4
3.2.2	AC 電源	4
3.3	試験	4
3.4	補足	6
4	誘導信号サセプティビリティ	6
4.1	共通事項	7
4.1.1	機器のカテゴリ	7
4.1.2	周波数掃引	7
4.1.3	妨害発生用電源	7
4.2	機器への磁界の誘導	7
4.2.1	試験レベル	7
4.3	機器への電界の誘導	8
4.3.1	試験レベル	8
4.4	ケーブルへの磁界の誘導	9
4.4.1	試験レベル	9
4.5	ケーブルへの電界の誘導	9
4.5.1	試験レベル	10
4.6	ケーブルへのスパイクの誘導	10
5	補足	11
5.1	MIL-STD-461G との比較	11
6	参考資料	11

1 概要

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 つとなつてはいるものの、それが発行した文書が直接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、17 章の電圧スパイク、18 章の音声周波伝導サセプティビリティ、及び 19 章の誘導信号サセプティビリティ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 電圧スパイク

DO-160G の 17 章で述べられている電圧スパイクに対する試験は、AC や DC の電源線上に生じるかも知れない電圧スパイク (サージ) への耐性の確認を意図している。

このような電圧スパイクは電源線上の他の機器の開閉によって生じるかも知れず、機器の誤動作や損傷を引き起こすかも知れない。

2.1 機器のカテゴリ

- カテゴリ A

電圧スパイクによる損傷に対する高度の保護が必要な設備での使用が意図された機器

- カテゴリ B

電圧スパイクによる損傷に対するより低い基準を受容できる設備での使用が意図された機器

2.2 試験波形、及び試験レベル

この試験で用いられる電圧スパイクは、開放回路電圧波形の立ち上がり時間が $2 \mu\text{s}$ 以下、持続時間が $10 \mu\text{s}$ 以上 (図 1 (a), 図 2)^{†3} のもので、試験レベルはそのピーク電圧 E で、

- カテゴリ A — 600 V
- カテゴリ B — ライン電圧 (AC の場合は実効値) $\times 2$ 、あるいは 200 V のいずれか小さい方

である。

試験発生器の出力インピーダンスは 50Ω で、出力を $50 \Omega \pm 10\%$ で終端した時 (図 1 (b)) のピーク電圧は規定された電圧/2 $\pm 10\%$ の範囲内でないといけない。

2.3 試験

図 3 ~ 図 5 のような構成で、それぞれの電源導体に 1 分以内の期間に 50 回以上の正の電圧スパイクを、また 1 分以内の期間に 50 回以上の負の電圧スパイクを印加する。

^{†3} 電圧スパイク波形の時間のパラメータは 10% - 90% や 50% - 50% の時間ではなく、0% - 100%、0% - 0% の時間で規定されている。

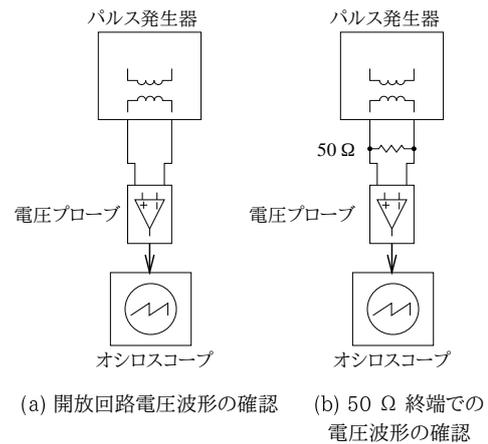


図 1: 電圧スパイク — 波形の検証

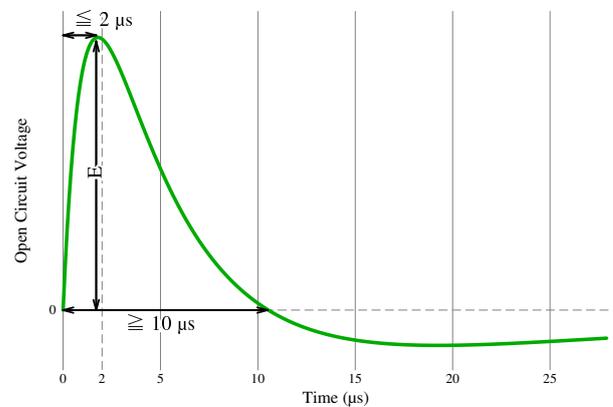


図 2: 電圧スパイク — 試験波形 (開放回路電圧波形)

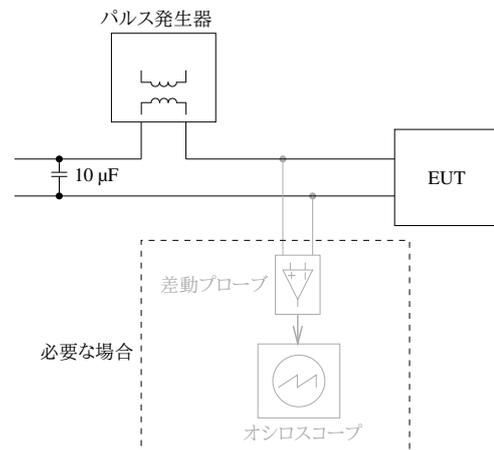


図 3: 電圧スパイク — 試験の構成の例 (DC や単相 AC)

複数の電源入力と同じ電源ラインに接続される場合、それらの電源入力全てを同時に試験する。

試験時に電圧波形を観測する必要はないが、必要な場合は高入力インピーダンスの電圧プローブ^{†4}を

^{†4} 電源の片側が接地されている場合以外は、差動プローブ、

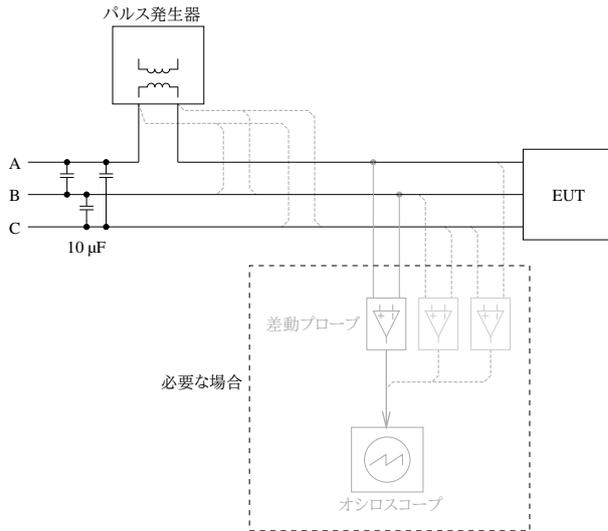


図 4: 電圧スパイク — 試験の構成の例 (3 相 3 線)

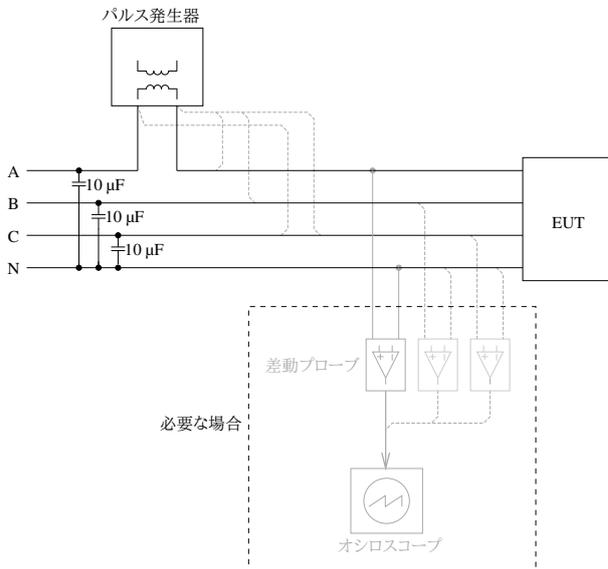


図 5: 電圧スパイク — 試験の構成の例 (3 相 4 線)

介してオシロスコープを接続して観測することができる。

試験時に EUT の電源入力に現れる電圧スパイクのピーク値は試験レベルよりも著しく低くなるかも知れないが、これは正常である。

妨害は電源と直列に印加されるため、電源側のインピーダンスが高ければ EUT の電源入力へのスパイクの注入が妨げられる可能性があるが、電源側に入れた 10 µF の適切なコンデンサ^{†5}は印加される

あるいは入力がフローティングとなっているオシロスコープが必要となる。

^{†5} その電源での使用に適した、サージへの耐性を持つコンデンサ (例えば X1 か X2 として安全認証を受けたフィルム・コンデンサ)。AC 電源の場合、コンデンサには相当の電流 (400 Hz

スパイクに対して低インピーダンスを示し、電源側のインピーダンスの影響で EUT 側にスパイクが適切に印加されなくなることを防ぐだろう。

これらのコンデンサは印加されたスパイクの電源側への伝播も相当低減するであろうが、電源に安定化電源を用いる場合は特に、電源の保護のために電源への接続を適切なノイズ・フィルタ^{†6}を通して行うことを考慮する価値があるかも知れない。

3 音声周波伝導サセプティビリティ

DO-160G の 18 章で述べられている音声周波伝導サセプティビリティ試験は、航空機の交流や直流の電源で予期される、AC 電源の高調波などに起因する周波数成分を機器が受容できるかどうかの評価を意図している。^{†7}

3.1 機器のカテゴリ

- カテゴリ R(CF), R(NF), R(WF), R

一次電源が定周波や可変周波の AC システムから給電される、また DC システムが変圧器 - 整流器ユニットから給電される機器での使用が意図された機器で、それぞれ、

- R(CF) — AC (定周波);
- R(NF) — AC (狭い可変周波);
- R(WF) — AC (広い可変周波);
- R — DC。

- カテゴリ B

エンジン駆動のオルタネータ/整流器から、あるいは DC バスに相当の容量のバッテリーが常に接続されている DC 発電機から給電されるシステムでの使用が意図された DC 機器。

他の規定がない限り、14 V の機器の試験レベルは 28 V の機器の試験レベルの半分とする。

^{†15} 115 V の場合は約 3 A) が継続的に流れることにも留意すべきである。

^{†16} 必要な電圧と電流に、また AC 電源の場合は試験で 사용되는電源周波数に対応したもの。

^{†17} MIL-STD-461G CS101^{[2][6]} や ISO 11452-10^{[5][7]} もこれと似た試験を定めている。

● カテゴリ Z

この規格の対象となるその他の全ての種類のシステムで使用できる DC 機器。

カテゴリ Z はカテゴリ R や B の代わりとして受け入れられる。

このカテゴリの例は、DC バスにバッテリーが接続されない、あるいはバッテリーが制御機器や保護機器によって切り離されるかも知れない、あるいはバッテリーの容量が発電機の容量に対して小さい、可変速発電機から給電される DC システムである。

● カテゴリ K

一次電源がカテゴリ R 機器に適用される AC よりも高い電圧歪みを持つ定周波や可変周波の AC システムから給電されるシステムでの使用を意図した機器。

カテゴリ K はカテゴリ R の代わりとして受け入れられる。

3.2 試験レベル

3.2.1 DC 電源

DC 電源に対する試験レベル (ピーク-ピーク電圧) を図 6 に示す。

試験周波数範囲はカテゴリ B では 200 Hz ~ 15 kHz、その他のカテゴリでは 10 Hz ~ 148.5936 kHz で、試験レベルは電源電圧によって異なる。

3.2.2 AC 電源

AC 電源に対する試験レベル (最大公称電源電圧に対する比率) を表 1 に示す。

最大公称電源電圧が 122 V とすると、8 % の試験レベルは 10 V rms 弱、28 V_{P-P} 弱に相当する。

400 Hz 115 V の電源波形に妨害を重畳した電圧波形の例を図 7 ~ 図 8 に示す。

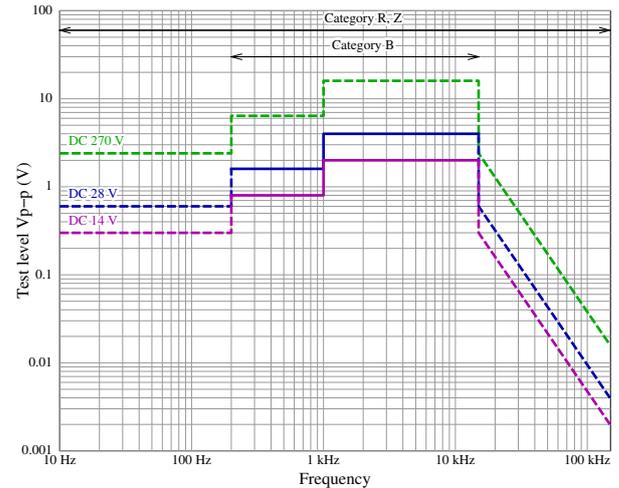
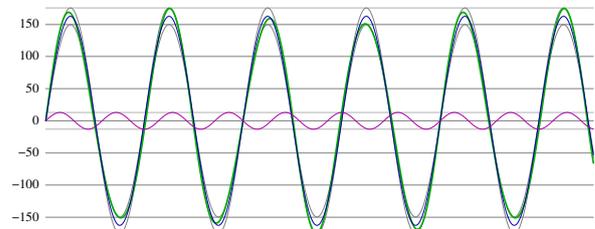
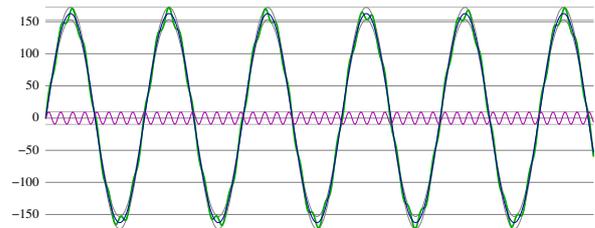


図 6: 音声周波伝導サセプティビリティ — DC 電源に対する試験レベル



青: 400 Hz, 紫: 700 Hz 8 %, 緑: 合成波形

図 7: 音声周波伝導サセプティビリティ — 400 Hz の電源に 700 Hz 8 % の妨害を重畳した波形の例



青: 400 Hz, 紫: 約 32 kHz 6 %, 緑: 合成波形

図 8: 音声周波伝導サセプティビリティ — 400 Hz の電源に約 32 kHz 6 % の妨害を重畳した波形の例

3.3 試験

試験は以下のように行なう:

1. EUT の電源入力に現れる電圧を監視しながら、電源導体に結合用変圧器を介して妨害を注入できるように接続する (図 9)。†8

†8 この規格では電力増幅器や結合用変圧器に対する具体的な

カテゴリ	電源周波数	試験レベル (最大公称電源電圧に対する比率)
R(CF)	(400 Hz)	700 Hz~16 kHz: 6 %
K	(400 Hz)	700 Hz~7.6 kHz: 8 %, 7.6 kHz~16 kHz: 6 %
R(NF)	360^{+5}_0 Hz	700 Hz~26 kHz: 6 %
R(NF)	650^{+0}_5 Hz	1100 Hz~32 kHz: 6 %
K	360^{+5}_0 Hz	700 Hz~12.4 kHz: 8 %, 12.4 kHz~26 kHz: 6 %
K	650^{+0}_5 Hz	1100 Hz~12.4 kHz: 8 %, 12.4 kHz~32 kHz: 6 %
R(WF), K	360^{+5}_0 Hz	700 Hz~15.2 kHz: 8 %, 15.2 kHz~32 kHz: 6 %
R(WF), K	800^{+0}_5 Hz	1400 Hz~15.2 kHz: 8 %, 15.2 kHz~32 kHz: 6 %

表 1: 音声周波伝導サセプティビリティ — AC 電源に対する試験レベル

結合用変圧器の電源側には、DC 電源の場合は $100 \mu\text{F}$ 以上、AC 電源の場合は $8 \mu\text{F}$ 以上のコンデンサを接続する。

必要な場合、注入された電流を測定するための電流プローブを妨害を注入する電源導体に取り付けて良い。

- EUT の電源入力に現れる妨害電圧が試験レベルに達するまで注入する妨害のレベルを上げる。電圧が試験レベルに達する前に注入される妨害電流が $36 \text{ A}_{\text{P-P}}$ に達したならば、妨害のレベルをそれ以上上げる必要はない。^{†9}

- EUT の電源入力に現れる妨害電圧が該当する試験レベルを下回らない、もしくは注入される電流が $36 \text{ A}_{\text{P-P}}$ を下回らない状態を維持しながら、

- ステップでの掃引の場合、30 ステップ/ディケード以上の周波数ステップ、各周波数で 1 分以上のドウェル・タイム
- 連続的な掃引の場合、60 分/ディケードよりも早くない掃引速度

で周波数掃引を行なう。

- 接地されていない全ての電源導体に対してこの試験を行なう。

要求は示されていない。ISO 11452-10^{[5][7]} もこれと似た試験を定めており、その規格では出力インピーダンス 2Ω 以下の電力増幅器と変圧比 2:1 の結合用変圧器の使用が定められている。

^{†9} これは、典型的には EUT の電源入力のコンデンサの影響で EUT の電源入力のインピーダンスが低くなっている時に生じる。例えば、EUT の電源入元に $1000 \mu\text{F}$ のコンデンサが接続されている場合、15 kHz で $36 \text{ A}_{\text{P-P}}$ を注入した時に EUT の電源入元に現れる電圧は $0.4 \text{ V}_{\text{P-P}}$ 弱となり、また EUT の電源入元に $4 \text{ V}_{\text{P-P}}$ を生じさせるためには $380 \text{ A}_{\text{P-P}}$ 弱の電流を注入することが必要となる。

- DC 270 V カテゴリ Z 機器については、試験レベルを 2 倍として、コモン・モードでの試験も行なう (図 10)。^{†10}

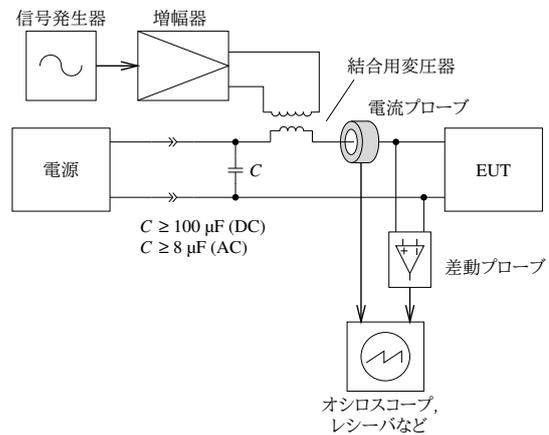
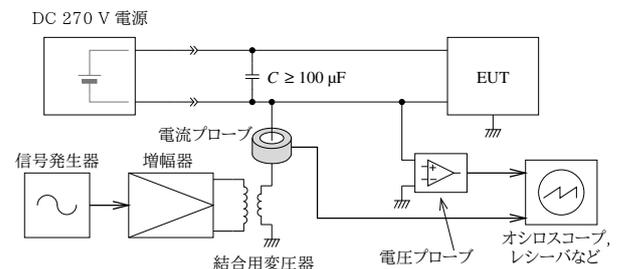


図 9: 音声周波伝導サセプティビリティ — 試験の構成の例 (直流や単相電源)

図 10: 音声周波伝導サセプティビリティ — コモン・モード試験の構成の例 (DC 270 V カテゴリ Z 機器のみ) ^{†10}

^{†10} DO-160G Figure 18-2 は EUT の電源入元にノーマル・モードで現れる電圧を測定するような図となっているが、これは誤記と思われる。

この試験は安定状態電流が最大となる動作モードと最小となる動作モードで行なう。但し、最大と最小の安定状態電流の比が 2:1 以下の場合は安定状態電流が最大となる動作モードでのみ試験すれば良い。

3.4 補足

- 結合用変圧器は方向性を持たず、電力増幅器から出力された妨害信号を試験対象のリードに結合させるのと同様、試験対象のリード上の電流を電力増幅器側に結合させる。

従って、電力増幅器はそれに耐え、またその状態で正常に機能するものである必要がある。^{†11}

さらに、EUT の電源の投入時に突入電流に伴う著しく高い電流が結合用変圧器の一次側に生じる可能性もある。これに伴う電力増幅器の損傷の防止のため、電源投入時には電力増幅器を切り離して結合用変圧器の一次側を抵抗でシャントしておき、電源投入後に電力増幅器を接続して抵抗を切り離すことが必要となるかも知れない。

- 印加された妨害電流は電源側にも流れるので、安定化電源を用いる場合は特に、電源への影響にも注意が必要となるかも知れない。^{†12}
- 妨害は電源側を通るループを流れる電流として注入されるため、電源側のインピーダンスが高い場合はその影響で妨害を注入しにくくなることもある。

電源側のコンデンサはこれを幾分軽減するかも知れないものの、100 μ F のコンデンサの 10 Hz でのリアクタンスは 160 Ω 程度となるので、低い周波数ではあまり効果は期待できない。これが問題となりそうな場合、10 Hz でのリアクタンスが十分に低くなるように大容量のコンデンサを追加することを考えても良いかも知れない。

AC 電源の場合、8 μ F のコンデンサの 700 Hz でのリアクタンスは 30 Ω 程度となるが、この

^{†11} 十分な出力容量を持つ 4 象限バイポーラ・アンプはこの用途で使用できるであろう。

^{†12} 電流が電源に逆流する状態となることがあるが、安定化電源の多くはこのような状態で正常に動作するには設計されており、異常動作や損傷を生じる可能性もある。直流電源の場合、電源として二次電池を用いることでこの問題に対処できるかも知れない。

場合はコンデンサの容量はあまり大きくできないので、電源側のインピーダンスが問題となる場合は別の対応が必要となりそうである。

- 印加されている妨害の振幅の測定を適切な帯域幅の交流電圧計や交流電流計で行なえる場合もあるかも知れないが、妨害を印加する箇所には印加する妨害以外の電圧や電流も存在していることがある (図 7~図 8) ため、例えばオシロスコープやレシーバ (スペクトラム・アナライザ) を用いて、印加している妨害とその他のものを弁別することが必要となるかも知れない。
- 電源の片側が接地されている場合を除き、電圧の測定に用いる測定器 (図 9 で「オシロスコープ、レシーバなど」となっているもの) は、差動プローブなどを介して接続するか、あるいは入力自身がフローティングとなっている測定器を用いることが必要となる。

レシーバやスペクトラム・アナライザを接続する場合には、通常、絶縁、信号レベルの調整、整合を与えるトランスジューサが必要となる。^{†13}

- 使用するコンデンサは、その電源での使用に適した (例えば X1 か X2 として安全認証を受けた)、試験時に流れることが予期される電流に見合ったもの^{†14}とすべきである。

4 誘導信号サセプティビリティ

DO-160G の 19 章で述べられている誘導信号サセプティビリティ試験は、電源周波数とその高調波、音声周波信号、他の機器が発生する妨害などの EUT やその相互接続線への誘導の影響の評価を意図している。

電源線は音声周波伝導サセプティビリティ (§3) で評価され、この試験の対象から除外される。

^{†13} 例えば、Pearson Electronics 社の “Powerline Ripple Detector” のような。^[12]

^{†14} コンデンサには試験で注入される電流 (通常は最大 36 A_{p-p}、すなわち約 13 A rms) の多くが流れる可能性があり、さらに電源が交流の場合はそれに応じた電流 (400 Hz 115 V の場合は約 3 A) が継続的に流れる。通常、コンデンサに安全に流せる電流は許容リップル電流 (周波数によって異なる) として示される。

4.1 共通事項

4.1.1 機器のカテゴリ

機器のカテゴリは3つの文字で示され、それぞれの文字は表2に示したような意味を持つ。

例えばカテゴリ ACX は、干渉を受けない動作が望ましいが必須ではなく、主電源が定周波 (おそらく 400 Hz) か DC の航空機に設置され、「機器内への電界の誘導」の要求に従っていないことを意味する。

カテゴリ	説明
C□□	干渉を受けない動作が必要で、長い配線や最小限の配線の間隔のために強い結合が生じる
Z□□	干渉を受けない動作が必要
A□□	干渉を受けない動作が望ましい
B□□	干渉が受容可能な範囲に管理されるであろうシステムでの使用を意図
□C□	主電源が定周波 (例えば 400 Hz) か DC の航空機に設置される
□N□	主電源が狭い可変周波 (例えば 350~650 Hz) の航空機に設置される
□W□	主電源が広い可変周波 (例えば 350~800 Hz) の航空機に設置される
□□E	「機器内への電界の誘導」に従う
□□X	「機器内への電界の誘導」に従わない

表 2: 誘導信号サセプティビリティ — 機器のカテゴリ

4.1.2 周波数掃引

§4.2~§4.5 の試験では、試験が必要な周波数範囲について、

- ステップでの掃引の場合、30 ステップ/ディケード以上の周波数ステップ、各周波数で 10 秒以上のドウェル・タイム
- 連続的な掃引の場合、5 分/ディケードよりも早くない掃引速度

で周波数掃引を行なう。

4.1.3 妨害発生用電源

§4.2~§4.5 の試験で磁界や電界の発生に用いる電源は EUT の電源と同期してはならない。

4.2 機器への磁界の誘導

図11のように、所定の電流を流した結合用のワイヤで、EUT の

- 前面、上面、後面
- 左側面、上面、右側面

の全面を走査する。

結合用のワイヤは EUT の面から 0.15 m の距離に水平に保持する。^{†15}このワイヤは EUT の境界から 0.6 m 以上外まで真っ直ぐに延びていなければならない。そのワイヤに給電するための導線はそのワイヤや EUT から 0.6 m 以上離れていなければならない。

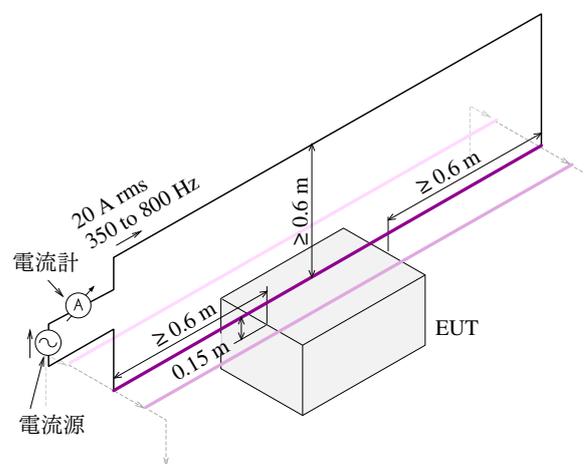


図 11: 誘導信号サセプティビリティ — 機器への磁界の誘導 — 試験セットアップの例

参考までに、給電用の導線を結合用のワイヤから 0.6 m の位置に平行に引いた場合の磁界の分布を図13に、また結合用のワイヤの真下での EUT の面からの深さに対する磁界の強さを推定したものを図12に示す。

4.2.1 試験レベル

試験レベルは共通で、主電源が定周波か DC (C)、狭い可変周波 (N)、広い可変周波 (W) のいずれであるかに応じて試験周波数範囲が変わる:

^{†15} 結合用の真下、EUT の面の位置での磁界の強さは 20 A/m 程度で、EUT の深い位置での磁界の強さは位置に応じて低下する。おそらく結合用のワイヤと並行に引かれるであろう給電用のワイヤまでの距離も磁界の強さに有意に影響し、深い位置ではその影響も大きくなる。図12参照。また、図13には給電用の導線までの距離を 0.6 m とした場合の、図14には給電用の導線までの距離を 0.3 m とした場合の磁界の分布を示しているが、後者の方が磁界の広がりが有意に小さくなっているのがわかるだろう。

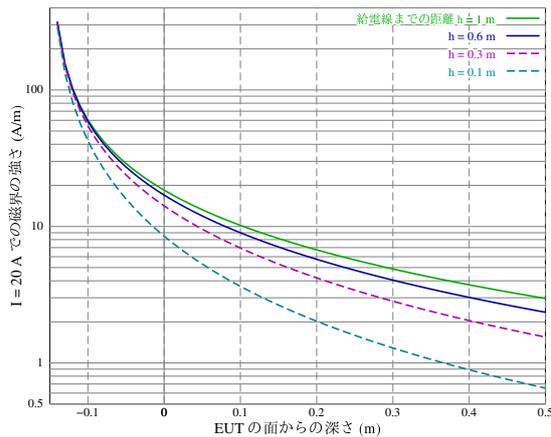


図 12: 誘導信号サセプティビリティ — 機器への磁界の誘導 — EUT の面からの深さと磁界の強さ

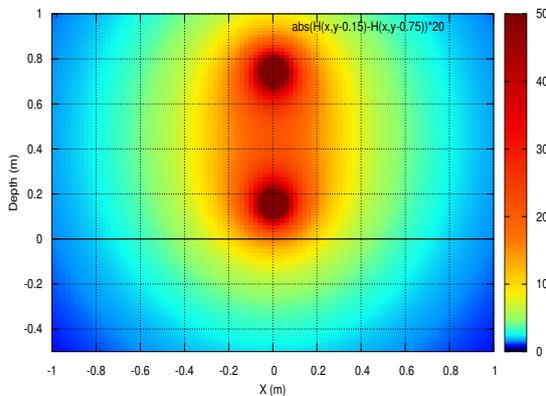


図 13: 誘導信号サセプティビリティ — 機器への磁界の誘導 — 磁界の分布 (給電用の導線までの距離を 0.6 m とした場合)

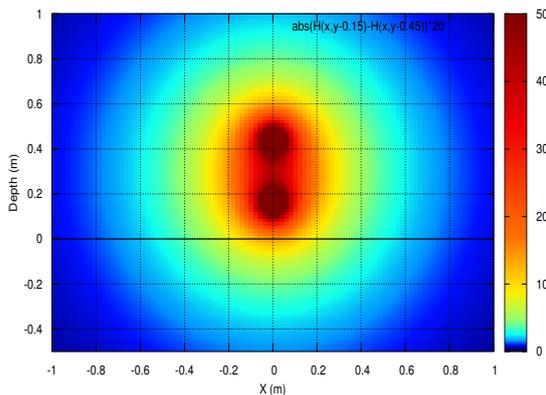


図 14: 誘導信号サセプティビリティ — 機器への磁界の誘導 — 磁界の分布 (給電用の導線までの距離を 0.3 m とした場合)

- カテゴリ □C□ — 400 Hz: 20 A rms
- カテゴリ □N□ — 350~650 Hz: 20 A rms
- カテゴリ □W□ — 350~800 Hz: 20 A rms

4.3 機器への電界の誘導

図 15 のように、所定の電圧を印加した結合用のワイヤで、EUT の

- 前面、上面、後面
- 左側面、上面、右側面

の全面を走査する。

結合用のワイヤは直径 0.7 mm 以上、長さ 20 cm のものとし、EUT の面から 1 cm の距離に水平に保持する。^{†16}

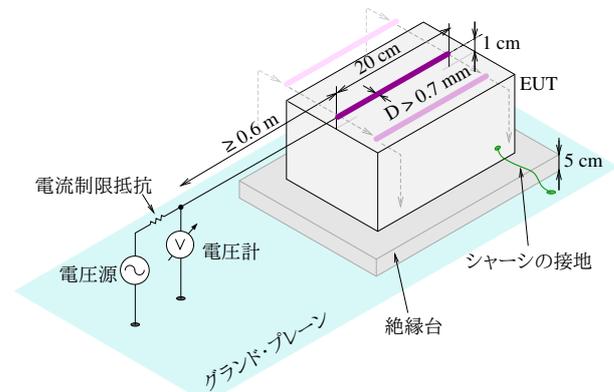


図 15: 誘導信号サセプティビリティ — 機器への電界の誘導 — 試験セットアップの例

結合用のワイヤには感電の危険のある電圧が印加されるので、接続部や開放となっている末端部を含めて適切に絶縁すべきであり、また感電のリスクの低減のために適切な電流制限抵抗を介して接続すべきである。^{†17}

4.3.1 試験レベル

試験レベルは共通で、主電源が定周波か DC (C)、狭い可変周波 (N)、広い可変周波 (W) のいずれであるかに応じて試験周波数範囲が変わる:

^{†16} EUT の筐体が導電性の場合、結合用のワイヤと筐体のあいだには強い電界が生じるが、筐体内には電界はほとんど侵入しない。EUT の筐体为非導電性の場合は内部の部品や配線が強い電界に曝されるだろうが、周波数が低いため、その影響は限定的なものとなりそうである。

^{†17} IEC 61010-1 では、接触可能な部分について、正常状態で 0.5 mA rms 以下、単一故障状態で 3.5 mA rms 以下という限界が示されている。例えば適切な定格の 500 kΩ 以上の抵抗 2 つを直列にしたものを電流制限抵抗として用いれば、170 V rms を印加した状態でその 2 つの抵抗よりも先の導電性の部分に触れた場合でも人体に流れる電流をその限界内に抑えることができる。

- カテゴリ □CE — 400 Hz: 170 V rms
- カテゴリ □NE — 350~650 Hz: 170 V rms
- カテゴリ □WE — 350~800 Hz: 170 V rms

この試験を適用しない機器はカテゴリ □□X として識別される。

4.4 ケーブルへの磁界の誘導

試験対象のケーブルの、EUT や周辺機器から 0.15 m 以上離れた長さ L の範囲に沿うように結合用のワイヤを引き、そのワイヤに試験レベルに対応した電流を流して試験対象のケーブルへの誘導を発生させる。

試験対象のケーブルと結合用のワイヤの距離は 5 mm 以下とし、そのワイヤに給電するための導線は 1 m 以上離して引く。

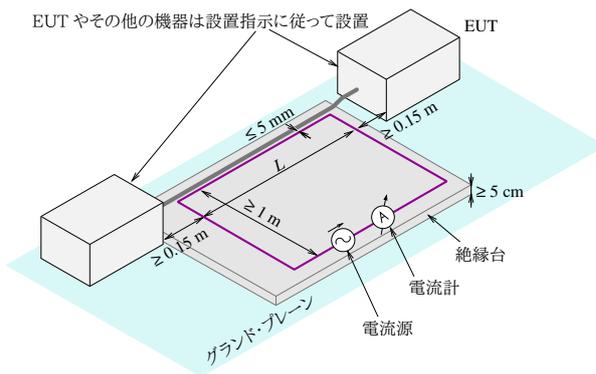


図 16: 誘導信号サセプティビリティ — ケーブルへの磁界の誘導 — 試験セットアップの例

試験対象のケーブルの反対側に接続される周辺機器のコモン・モード・インピーダンスが EUT 側に誘起する妨害に影響することが予想されるので、周辺機器側のコモン・モード・インピーダンスが実際の使用で予想されるものよりも高くないようにすべきであろう。

4.4.1 試験レベル

試験レベルを 図 17 に図示する。この試験レベルは $I \times L$ (A·m) の値で規定されており、結合用のワイヤに流すべき電流 I (A) はその値を結合長 L (m) で割ることで求められる。例えば $L = 1$ m と

した場合は $A \cdot m$ の値をそのまま A に読み替えれば良い。^{†18}

カテゴリ B□□ の機器はこの試験の対象から除外される。

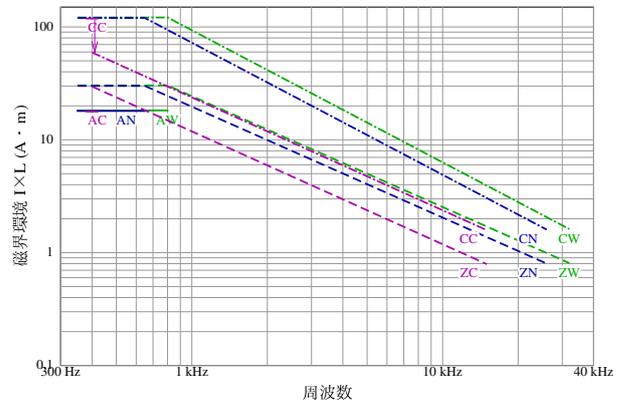


図 17: 誘導信号サセプティビリティ — ケーブルへの磁界の誘導 — 試験レベル

4.5 ケーブルへの電界の誘導

試験対象のケーブルの EUT や周辺機器から 0.15 m 以上離れた長さ L の範囲に結合用のワイヤを 1 m 当たり 3 回の割合で巻き付け、そのワイヤに試験レベルに対応した電圧を印加して試験対象のケーブルへの誘導を発生させる。

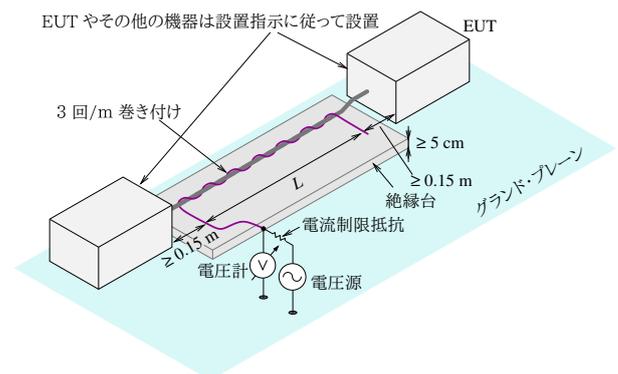


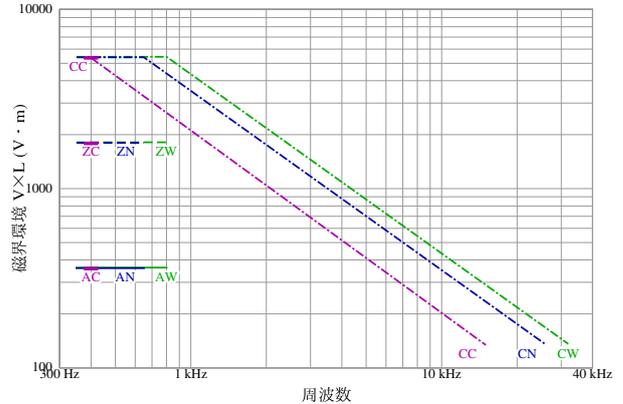
図 18: 誘導信号サセプティビリティ — ケーブルへの電界の誘導 — 試験セットアップの例

^{†18} 結合用のワイヤに電流を流すとワイヤ間の相互インダクタンスによって試験対象のケーブルに電圧が誘起する。結合用のワイヤと試験対象のケーブルのあいだの相互インダクタンス M は、それぞれのワイヤのグラウンド・プレーンからの高さを h_i 、導体の間隔を d として $M = 10^{-7} \cdot L \cdot \ln(1 + 4h_1h_2/d^2)$ より求められ^[8]、例えば $h_1 = h_2 = 50$ mm、 $d = 5$ mm、 $L = 1$ m の場合は $M \approx 6 \mu\text{H}$ となる。この場合、結合用のワイヤに 800 Hz 120 A を流すと試験対象のケーブルには $2\pi fMI = 3.6$ V 程度の誘導電圧が生じる計算となる。

妨害はケーブルと結合用ワイヤのあいだの静電容量を介して結合し、この静電容量は導体間の距離が大きくなれば小さくなるので、結合用のワイヤはケーブルに密着するようにしっかりと巻き付けるべきである。また、試験対象のケーブルの反対側に接続される周辺機器のコモン・モード・インピーダンスが EUT 側に誘起する妨害に影響することが予期されるので、周辺機器側のコモン・モード・インピーダンスが実際の使用で予期されるものよりも低くならないようにすべきであろう。^{†19}

結合用のワイヤには高電圧が印加されるため、開放となっている末端部を含めて適切に絶縁された状態^{†20}とし、また感電のリスクの低減のために適切な電流制限抵抗を介して接続すべきである。^{†21}

4.5.1 試験レベル

試験レベルを  に図示する。この試験レベルは $V \times L$ (V.m) の値で規定されており、結合用のワイヤに印加すべき電圧 V (V) はその値を結合長 L (m) で割ることで求められる。例えば $L = 1$ m とした場合は V.m の値をそのまま V に読み替えれば良い。

^{†19} 空気中に平行に引かれた円形断面の導体間の静電容量 C は、導体の半径を a と b 、導体の中心間の距離を d として、 $C = 2\pi\epsilon_0 L / \cosh^{-1}((d^2 - a^2 - b^2)/2ab)$ より求められ^[8]、例えば $a = b = 1$ mm、 $d = 3$ mm、 $L = 1$ m の場合は $C \approx 29$ pF となる。この場合、結合用のワイヤに 800 Hz 5.4 kV を印加した時、試験対象のケーブルには、試験対象のケーブルとグランド・プレーンのあいだの抵抗が 10 k Ω であれば 8 V 弱、抵抗が 100 Ω であれば 0.08 V 弱の電圧が生じる計算となる。但し、実際の試験構成では、試験対象のケーブルは通常は複数の導体を含む、導体のあいだには空気ではなくケーブルの被覆 (誘電率は空気の数倍で、それに応じて静電容量も大きくなる) があるなどの違いがあり、その挙動はこのような単純な計算では推定できない。

^{†20} 電気機器の配線で用いられるようなワイヤは定格 300~600 V、耐電圧 2 kV 程度のもが多く、このようなワイヤでは例えばカテゴリ C□□ の機器を $L = 1$ m で試験する場合に必要な 5.4 kV rms に対する絶縁は担保されないため、適切な定格の高圧ワイヤを用いるべきである。また、IEC 61010-1 の規定では、汚染度 2 の場合の 5~6.3 kV の二次回路に対する沿面距離は材料グループ I の場合でも 32 mm、材料グループ III の場合は 63 mm となっているので、その電圧が印加される箇所とその他の導電性の部分のあいだの沿面距離に留意するとともに、接続箇所や末端部から少なくともその範囲には触れられないようにした方がよい。

^{†21} IEC 61010-1 では、接触可能な部分について、正常状態で 0.5 mA rms 以下、単一故障状態で 3.5 mA rms 以下という限界が示されている。例えば適切な定格の 10 M Ω 以上の抵抗 2 つを直列にしたものを電流制限抵抗として用いれば、5.4 kV rms を印加した状態でその 2 つの抵抗よりも先の導電性の部分に触れた場合でも人体に流れる電流をその限界内に抑えることができる。

カテゴリ B□□ の機器はこの試験の対象から除外される。

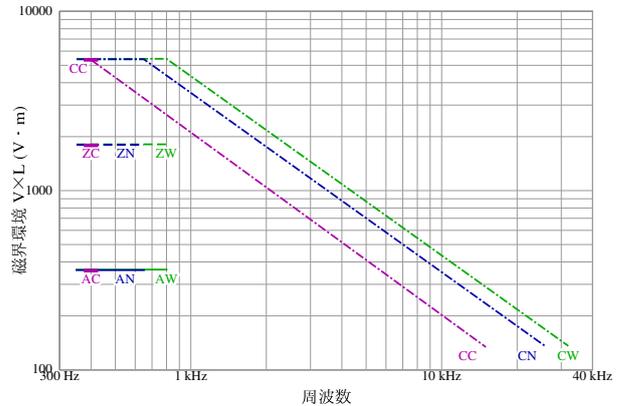
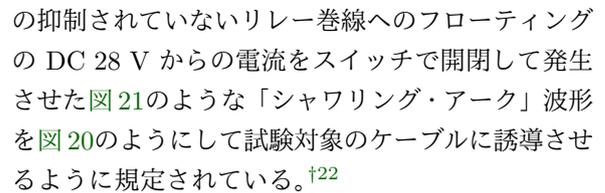
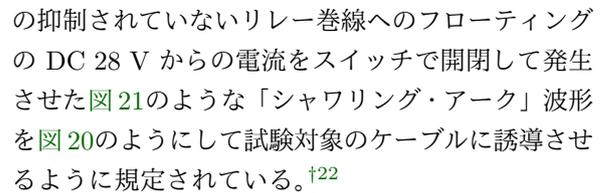


図 19: 誘導信号サセプティビリティ — ケーブルへの電界の誘導 — 試験レベル

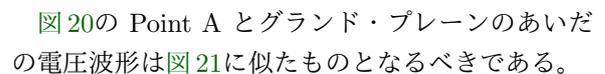
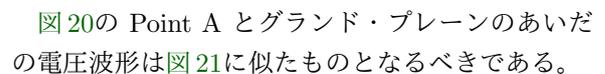
4.6 ケーブルへのスパイクの誘導

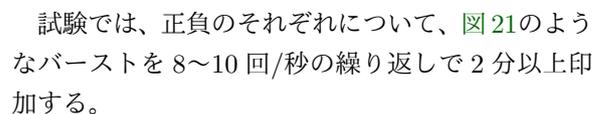
この試験では、

電圧	DC 28 V
電流	160 mA
抵抗	175 $\Omega \pm 10$ %
インダクタンス	励磁状態で 1.5 H ± 10 %

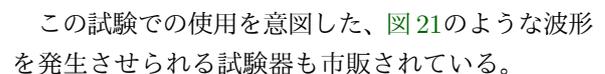
の抑制されていないリレー巻線へのフローティングの DC 28 V からの電流をスイッチで開閉して発生させた  のような「シャワーリング・アーク」波形を  のようにして試験対象のケーブルに誘導させるように規定されている。^{†22}

結合長 L は、カテゴリ B□□ では 1.2 m、その他のカテゴリでは 3 m とする。

 の Point A とグランド・プレーンのあいだの電圧波形は  に似たものとなるべきである。

試験では、正負のそれぞれについて、 のようなバーストを 8~10 回/秒の繰り返しで 2 分以上印加する。

リレー巻線への電流の開閉によって発生する波形は使用するリレーやスイッチなどに依存し、この方法で意図した波形を安定して発生させることは難しいかも知れない。

この試験での使用を意図した、 のような波形を発生させられる試験器も市販されている。

^{†22} 試験波形も試験法もかなり異なるが、ISO 7637-2 のパルス 3a/3b や IEC 61000-4-4 も同様の現象の模擬を意図している。

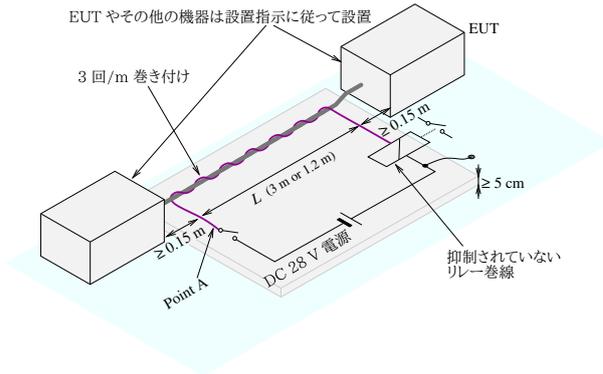


図 20: 誘導信号サセプティビリティ — ケーブルへのスパイクの誘導 — 試験セットアップの例

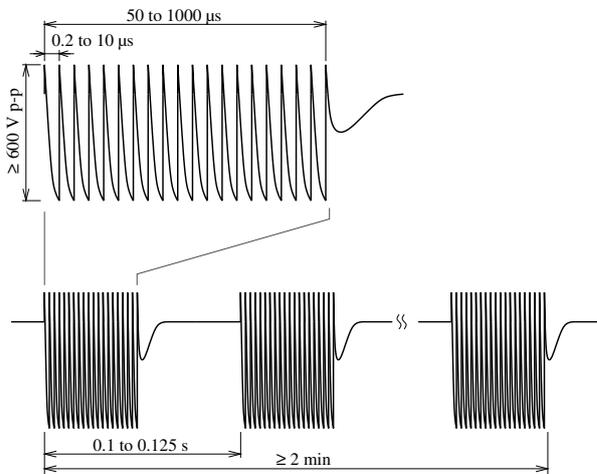


図 21: 誘導信号サセプティビリティ — ケーブルへのスパイクの誘導 — 試験波形

5 補足

5.1 MIL-STD-461G との比較

DO-160G の DC 電源に対する音声周波伝導サセプティビリティ試験レベルと MIL-STD-461G CS101 の試験レベルとの対比を図 22 に示す。

6 参考資料

- [1] 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

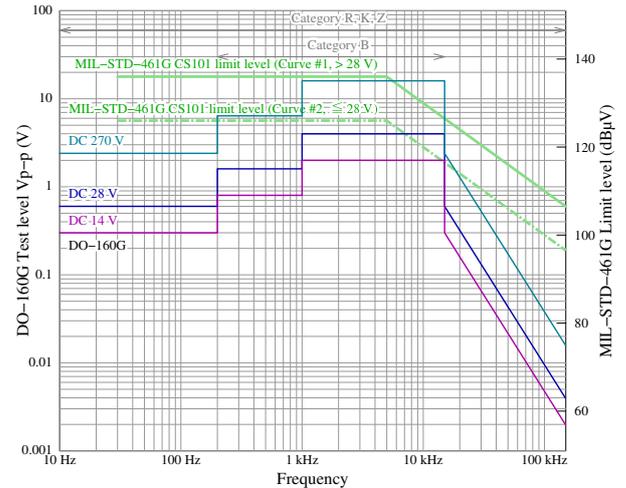


図 22: DO-160G 音声周波伝導サセプティビリティ試験レベルと MIL-STD-461G CS101 の試験レベルの比較

- [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/AdvisoryCircular/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] ISO 11452-10:2009, *Road vehicles – Component test methods for electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy – immunity to conducted disturbances in the extended audio frequency range*
- [6] 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>
- [7] 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>
- [8] *Electromagnetic Compatibility Handbook*, Kenneth L. Kaiser, 2005