

航空用機器の EMC — RTCA DO-160G の概要

Part 4: 雷の直接的な影響

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2020 年 12 月 21 日

目次

1	概要	1
2	雷の直接的な影響	2
2.1	カテゴリ	2
2.1.1	被雷ゾーン	2
2.2	高圧着雷試験	3
2.2.1	試験波形	3
2.2.2	先駆放電着雷試験	3
2.2.2.1	セットアップ	4
2.2.2.2	試験手順	4
2.2.2.3	結果の解釈	5
2.2.3	走査放電路着雷試験	5
2.2.3.1	セットアップ	6
2.2.3.2	試験手順	6
2.3	高電流物理損傷試験	6
2.3.1	高電流試験波形	6
2.3.2	アーク侵入試験	8
2.3.3	試験セットアップ	8
2.3.3.1	試験手順	8
2.3.3.2	結果の解釈	9
2.3.4	追加の試験要求	9
3	補足	9
3.1	参考: 雷電流のパラメータ	9
3.2	参考: 雷雲から大地への雷放電の発生	9
4	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、23 章の雷の直接的な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 雷の直接的な影響

DO-160G の 23 章で述べられている雷の直接的な影響^{†3}に関する要求は機体の導電性の構造の外部に取り付けられる機器やケーブルへの雷撃の影響の評価を意図したもので、

- 高圧着雷試験 (§2.2)
- 高電流物理損傷試験 (§2.3)

の 2 つの試験が示されている。^{†4}

この対象となる機器の例には、アンテナ、外部灯火、エア・データ・プローブ、外部センサ、防除氷装置、磁気燃料レベル計、給油口キャップ、ドレイン・バルブなどがある。

航空機に搭載される機器やそのケーブルの多くは機体の導電性の構造の内側に設置され、雷に関しては間接的な影響が主な懸念となる。このような現象に関しては DO-160G の 22 章で述べられており、これについては既にこのシリーズの Part 3^[13] で触れている。

2.1 カテゴリ

この試験に関するカテゴリ指定は高圧着雷試験のカテゴリと高電流物理損傷試験のカテゴリから成り、それぞれのカテゴリはカテゴリ 3N 以外ほどの被雷ゾーンへの設置が意図されているかに直接対応する。

カテゴリ 3N は伝統的な設計で与えられる保護の水準を著しく低下させ得る、あるいは立証済みの保守の履歴のない、新しい、あるいは特殊な設計上の特徴を持つ、ゾーン 3 の領域への取り付けが意図された機器への適用が意図されている。

試験の要求はカテゴリによって異なり、その一覧を表 1 に示す。

2.1.1 被雷ゾーン

航空機の被雷ゾーンは SAE ARP5414 (EUROCAE ED-91) で規定されており、次のようになる：^{†5}

- ゾーン 1A

雷放電路着雷時に第一帰還雷撃が生じそうな、その場所への放電が持続する可能性は低い、航空機の表面

例えば：機首(レドームとその後方)、エンジンの前部、翼端付近
- ゾーン 1B

雷放電路着雷時に第一帰還雷撃が生じそうな、その場所への放電が持続する可能性が高い領域

例えば：翼端後部
- ゾーン 1C

雷放電路着雷時に低下した振幅の第一帰還雷撃が生じそうな、その場所への放電が持続する可能性は低い領域

例えば：機首やエンジン前部のゾーン 1A の領域の後方
- ゾーン 2A

後続雷撃が走査しそうな、その場所への放電が持続する可能性は低い領域

例えば：胴体、エンジンの残りの部分
- ゾーン 2B

後続雷撃が走査しそうな、その場所への放電が持続する可能性が高い領域

例えば：翼の後部(ゾーン 2A の領域の後側)
- ゾーン 3

雷撃を受ける可能性が低い領域

例えば：翼の先端付近以外の部分

^{†3} [5] 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期待される。

^{†4} 雷撃を模擬する電圧と電流を同時に発生することは困難であるため、現実的な妥協として、高電圧での試験と高電流での試験が別々に行なわれる。これらの試験は有効なものであるが、状況によってはこれらの試験法で単純に試験しただけでは雷の影響を適切に模擬できないかも知れない。

^{†5} 航空機への最初の雷撃は、典型的には機首付近などに生じる。後続雷撃は最初の雷撃によって大気中に形成された放電路を辿るが、航空機の移動に伴って雷撃を受ける箇所は機体の後方に移動する。最初の雷撃が機首付近に生じた場合、後続の雷撃は胴体に沿って後方に移動し、持続的な放電を受ける箇所が生じる可能性は低い。だが、最初の雷撃が翼の先端の前方に生じた場合はその後部が、最初の雷撃がエンジンの前方に生じた場合はエンジン後部が持続的な放電を受ける可能性が高い。航空機の被雷ゾーンは、このような雷撃の挙動を考慮して定められている。航空機のどの部分がどの被雷ゾーンに該当するかを図示したものは [8] などでも見ることができる。

カテゴリ	ゾーンの性質 (生じそうな被雷)				高圧着雷 試験		高電流物理損傷試験						
	第一帰還雷撃	低下した振幅の第一帰還雷撃	後続雷撃	放電の持続	先駆放電着雷試験	走査放電路着雷試験	A (第一帰還雷撃電流)	A _h (移行ゾーン電流)	A/5 (ゾーン3アーク侵入電流)	B (中間領域電流)	C* (持続が短い持続電流)	C (持続電流)	D (後続雷撃電流)
1A	✓				✓		✓			✓	✓		
1B	✓			✓	✓		✓			✓		✓	✓
1C		✓				✓		✓		✓	✓		
2A			✓			✓			✓	✓	✓		✓
2B			✓	✓		✓			✓	✓		✓	✓
3N						✓		✓		✓	✓		✓

表 1: 各カテゴリに対する試験の一覧

2.2 高圧着雷試験

高圧着雷試験 (high voltage strike attachment testing) は着雷を生じそうな箇所の同定を意図したもので、以下の2つの試験がある:

- 先駆放電着雷試験 (§2.2.2);
- 走査放電路着雷試験 (§2.2.3)。

これらの試験で同定された着雷点の情報は、高電流物理損傷試験 (§2.3) での試験箇所の決定に利用されるかも知れない。

それぞれのカテゴリに対して適用される試験法と試験波形を表2に示す。

カテゴリ	試験タイプ	波形	
		A	D
1A	先駆放電着雷試験 (§2.2.2)		✓
1B	先駆放電着雷試験 (§2.2.2)		✓
1C	走査放電路着雷試験 (§2.2.3)	✓	
2A	走査放電路着雷試験 (§2.2.3)	✓	
2B	走査放電路着雷試験 (§2.2.3)	✓	
3N	走査放電路着雷試験 (§2.2.3)	✓	

表 2: 高圧着雷試験 — 試験法と試験波形

2.2.1 試験波形

先駆放電着雷試験 (§2.2.2) では電圧波形 D が、走査放電路着雷試験 (§2.2.3) では電圧波形 A が用いられる。

- 電圧波形 A

1000 kV/μs ±50 % の割合で上昇する電圧波形 (図1)。

上昇率はピーク電圧の 30 % から 90 % で測定する。

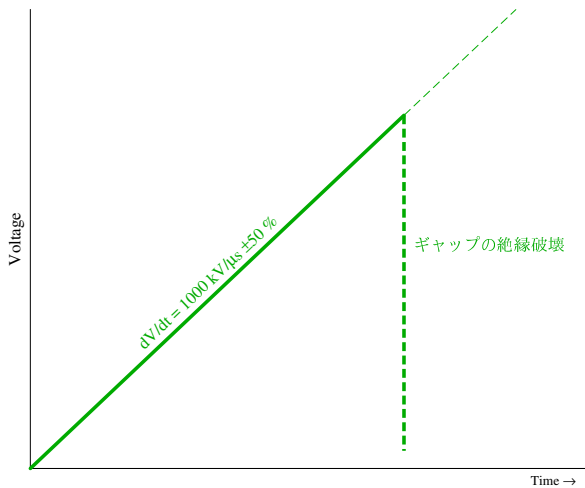
- 電圧波形 D

ピークまで 50~250 μs で上昇し、2000 μs 程度でピークの 50 % まで低下する電圧波形 (図2)。†6

2.2.2 先駆放電着雷試験

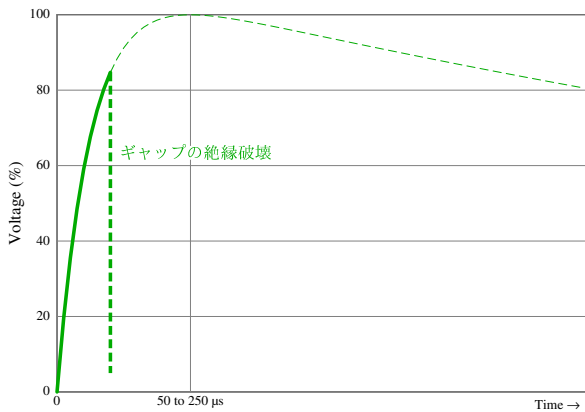
先駆放電着雷試験 (initial leader attachment test) は接近する先駆放電に伴う着雷 (第一帰還雷撃の発生) を模擬するもので、第一帰還雷撃を受けることが予期される、カテゴリ 1A、及び 1B の機器に適用される。

†6 電圧波形 D の電圧の上昇率は著しく低いですが、これは先駆放電の接近に伴う電界の上昇を模擬するためと思われる。



概算電圧要求		
総ギャップ長	電極: 正	電極: 負
0.5 m	750 kV	790 kV
1.0 m	1300 kV	1400 kV
1.5 m	2250 kV	2400 kV

図 1: 雷の直接的な影響 — 高圧着雷試験 — 電圧波形 A



総ギャップ長	電極: 正	電極: 負
0.5 m	350 kV	400 kV
1.0 m	500 kV	600 kV
1.5 m	600 kV	700 kV

図 2: 雷の直接的な影響 — 高圧着雷試験 — 電圧波形 D

2.2.2.1 セットアップ

1. 供試品をテスト・フィクスチャに取り付ける。
 テスト・フィクスチャは実際の設置を代表するものとし、試験計画書で規定する。
 レドーム内に取り付けられる機器については、実際に使用されるレドームとともに試験することになるだろう。

2. 供試品とテスト・フィクスチャをグランド・プレーンに取り付ける。
 グランド・プレーンは十分な大きさとし、電界集中の低減のために縁を丸める必要があるかも知れない (図 3)。^{†7}
3. 通常機体に接地される、供試品の上の、またそれに含まれる全ての導電性のハードウェアをテスト・プランに従ってグランド・プレーンに接続する。
4. 高電圧発生器^{†8} の出力の一方を電極に接続する。
5. 高電圧発生器の出力のもう一方をグランド・プレーンに接続する。
6. 高圧分圧器、オシロスコープ、放電撮影用のカメラを含む、監視/記録用機器をセットアップする

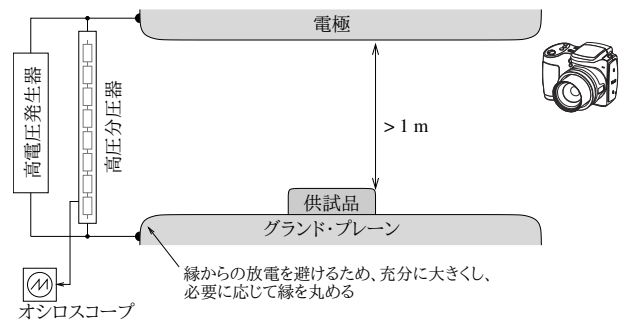


図 3: 雷の直接的な影響 — 高圧着雷試験 — 先駆放電着雷試験のセットアップの例

2.2.2.2 試験手順

1. 環境条件を記録する。
2. 安全上の手続きをレビューし、実施する。例えば:

^{†7} 突起や角があるとその付近に電界が集中し、その箇所からの放電を生じやすくなる。これは導電性のテスト・フィクスチャについても同様で、テスト・フィクスチャに実際の設置では存在しない角や突起があれば、それが試験に影響を与える可能性がある。

^{†8} 高電圧発生器は放電が発生する電圧 (ギャップが 1 m の場合でおそらく 1500 kV 弱) まで 1000 kV/μs ± 50 % の割合で電圧を上昇させられる必要がある。その他の特性、例えば発生可能な電流やエネルギーは規定されていないが、図 4 のような高電圧発生器が発生可能なエネルギーは高々 100 kJ のオーダーかも知れない。これに対して、実際の雷の電位差は 10⁸~10⁹ V、エネルギーは 10⁹~10¹⁰ J 程度となるかも知れない。[9]



(Photo by Darkking3, licensed under CC BY 3.0)

図 4: 高電圧インパルス試験システムの例 — 手前のタワーが発生器、奥のタワーが高圧分圧器

- 試験場所は安全とし、高圧発生器を作動させる前に人を排除する。
 - 試験後、人が試験場所に入る前にコンデンサ・バンクを短絡させる。
 - 眼と耳の保護を適切に行なう。
3. 後で試験の影響と見間違えるかも知れない傷がないか、供試品を良く観察する。
 4. 高電圧発生器を調整する:
 - (a) 供試品を金属箔で覆い、金属箔をグラウンドに接続する。
 - (b) 極性 (正極性を推奨) を選択し、印加電圧を測定しながら金属箔への試験を行なう。
 - (c) 波形が要求に従っていない場合、規定された波形を得られるように発生器のパラメータや電極の間隔を調整する。
 - (d) 金属箔を取り除く。
 5. 供試品を適切な方法で清掃し、埃、異物、また試験結果に影響するかも知れないその他の汚染を除去する。

6. 印加された電圧を測定し、またフラッシュオーバーの経路の証拠となる写真を撮影しながら^{†9} 供試品に放電を印加する。

放電が電圧波形の頂点に達する前の立ち上がりで生じることを確認する。

有効な試験のためには、

- 外部電極は最も近い導電性の部分 (供試品の外側や内側の) から少なくとも 1 m 離れているべき;
- 外部電極からの先駆放電は電極の縁から発生してはならない;
- 先駆放電とストリーマーの結合は供試品から離れた気中で生じるべき。

7. 高電圧発生器を停止させてコンデンサ・バンクを短絡し、接地棒で供試品の電荷を取り除く。
8. 供試品を確認して結果を文書化する。
9. 試験を少なくとも 2 回繰り返す。
10. 高電圧発生器の極性を逆にし、同様に試験を繰り返す。
11. テスト・プランに従って外部電極の位置を変え、同様に試験を繰り返す。

2.2.2.3 結果の解釈

- 着雷箇所は試験時の写真や供試品上の痕跡から同定できる。
- 供試品は試験後も意図したように機能しなければならない。

2.2.3 走査放電路着雷試験

走査放電路着雷試験 (swept channel attachment test) は機器を横切って移動する放電路^{†5} への放電を模擬するもので、先駆放電着雷試験の対象となる機器以外に適用される。

^{†9} 撮影は、部屋を暗くし、十分に離れた位置に設置したカメラのシャッターを放電のあいだ開いたままとすることで行なえるだろう。あるいは、高速カメラ (例えば 10000 フレーム/秒程度以上の) を用いて放電の過程を撮影することもできるかも知れない。

2.2.3.1 セットアップ

板状の電極を 1 m 以上離して置くのではなく先端の丸い棒状の電極を試験計画で指定された試験箇所の近くに置くこと、また球ギャップを並列に接続することを除き、先駆放電着雷試験 (§2.2.2.1) の場合と同様にセットアップする (図 5)。

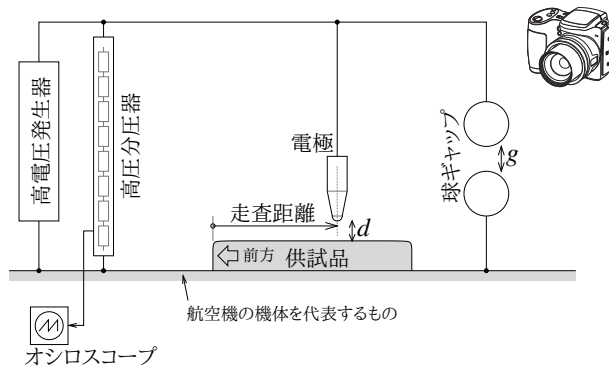


図 5: 雷の直接的な影響 — 高圧着雷試験 — 走査放電路着雷試験のセットアップの例

2.2.3.2 試験手順

先駆放電着雷試験の試験手順 (§2.2.2.2) と同様だが、手順 4 での高電圧発生器の調整を以下のように行なう:

...

4 高電圧発生器を調整する:

- (a) 140 kV/m と試験計画書で指定された走査距離 (機体に設置した状態での機器の前縁からの距離) との積に基づいて、所望の試験電圧を決定する。

走査距離が 0.5 m 以下の場合には試験電圧は 70 kV とする。

高電圧発生器を電圧波形 A を発生するように構成する。

- (b) 球ギャップ (g) を所望の試験電圧の 120~130 % で放電するように設定する。

高電圧発生器を球形ギャップが放電するように動作させ、放電開始電圧を記録する。放電は波形 A の立ち上がりで発生しなければならない。

必要であればギャップ (g) を変えて放電開始電圧を調整する。

- (c) 高電圧発生器の出力を高圧試験電極に接続する。

- (d) 電極が試験計画で指定された試験箇所の 1 つの上となるように供試品を試験電極の下に設置する。

供試品を金属箔で覆い、金属箔をグラウンドに接続する。

供試品から電極までの距離 (d) は 50 mm 以下とすべきである。

- (e) 高電圧発生器を動作させ、試験電極の放電開始電圧を記録する。

140 kV 以下の試験電圧では、電極が所望の試験電圧の -0% から $+10\%$ で放電を開始するように間隔を縮める必要があるかも知れない。

最大の試験電極間隔 d は 50 mm である。

- (f) 金属箔を取り除く。

...

2.3 高電流物理損傷試験

高電流物理損傷試験 (high current physical damage test) は雷撃電流を直接受けるかも知れない機器の損傷の評価のために用いられる。

この試験での試験箇所の決定に際しては、高圧着雷試験 (§2.2) で同定された着電点の情報を利用できるかも知れない。

2.3.1 高電流試験波形

雷撃電流は以下のコンポーネントの組み合わせとしてモデル化される (図 7):

- コンポーネント A — 第一帰還雷撃電流

ピーク電流: $200 \text{ kA} \pm 10\% \dagger^{10}$

アクション・インテグラル: $2 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s} \pm 20\%$

ピークの 1 % までの総持続時間: $500 \mu\text{s}$ 以下

10 % → 90 % の立ち上がり時間: $50 \mu\text{s}$ 以下

波形: 単方向、もしくは振動性

^{†10} コンポーネント A (第一帰還雷撃電流) の 200 kA のピーク電流は表 4 に示した LPL I の第一正極性雷撃のピーク電流と整合している。

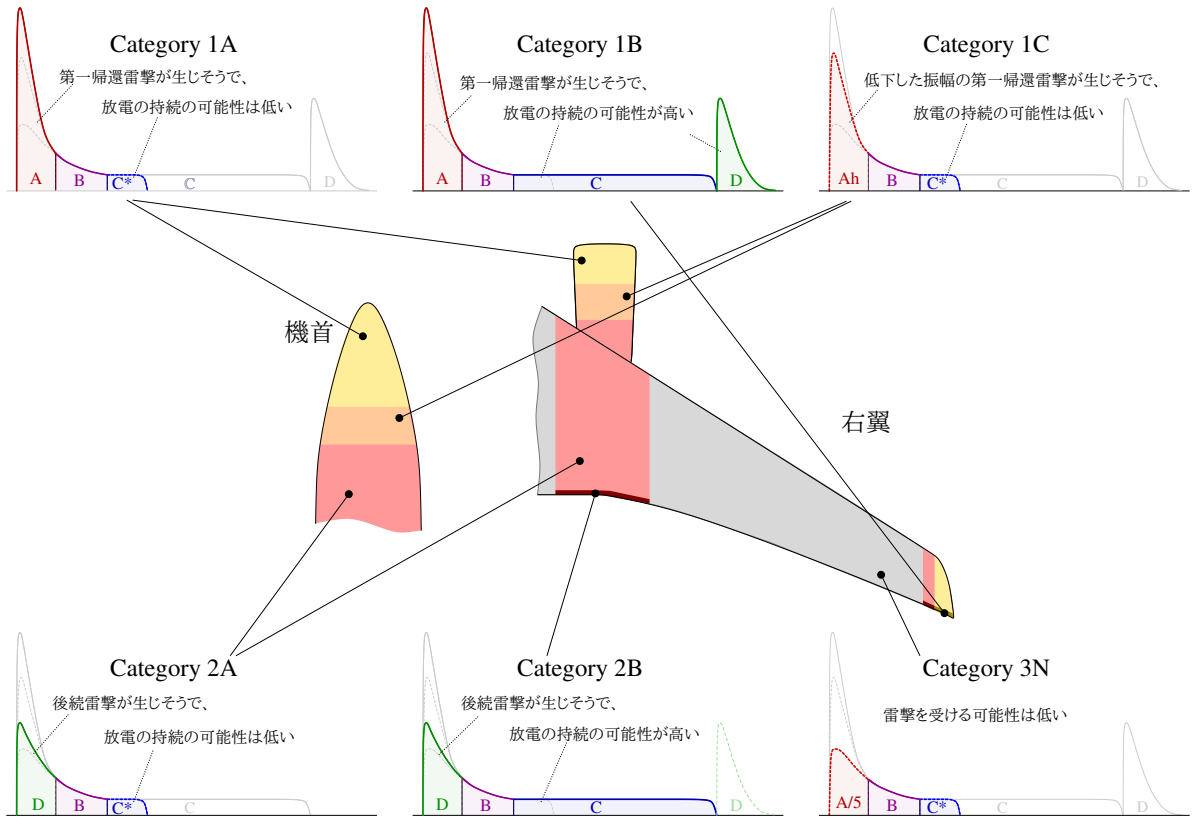


図 6: 雷の直接的な影響 — 高電流物理損傷試験 — 被雷カテゴリと高電流コンポーネントの適用

- コンポーネント A_h — 移行ゾーン電流

電荷量: 0.25~1.0 s のあいだに $200\text{ C} \pm 10\%$ ^{†11}

波形: 単方向で、矩形、あるいは指数的か直線的に低下

ピーク電流: $150\text{ kA} \pm 10\%$

アクション・インテグラル: $0.8 \times 10^6\text{ A}^2\text{s} \pm 20\%$

ピークの 1% までの総持続時間: $500\text{ }\mu\text{s}$ 以下

10% → 90% の立ち上がり時間: $50\text{ }\mu\text{s}$ 以下

波形: 単方向、もしくは振動性
- コンポーネント $A/5$ — ゾーン 3 アーク侵入電流

電荷量: $45\text{ ms} \pm 20\%$ のあいだに $18\text{ C} \pm 20\%$

波形: 単方向で、矩形、あるいは指数的か直線的に低下

ピーク電流: $40\text{ kA} \pm 10\%$

アクション・インテグラル: $0.08 \times 10^6\text{ A}^2\text{s} \pm 20\%$

ピークの 1% までの総持続時間: $500\text{ }\mu\text{s}$ 以下

10% → 90% の立ち上がり時間: $50\text{ }\mu\text{s}$ 以下

波形: 単方向、もしくは振動性
- コンポーネント B — 中間領域電流

平均電流: $2\text{ kA} \pm 20\%$

電荷量: $5\text{ ms} \pm 10\%$ のあいだに $10\text{ C} \pm 10\%$

波形: 単方向で、矩形、あるいは指数的か直線的に低下
- コンポーネント C — 持続電流

平均電流: $200\sim 800\text{ A}$
- コンポーネント C^* — 放電の持続が短い走査着雷ゾーンの持続電流

平均電流: 400 A 以上
- コンポーネント $A/5$ — ゾーン 3 アーク侵入電流

電荷量: $45\text{ ms} \pm 20\%$ のあいだに $18\text{ C} \pm 20\%$

波形: 単方向で、矩形、あるいは指数的か直線的に低下
- コンポーネント D — 後続雷撃電流

ピーク電流: $100\text{ kA} \pm 10\%$ ^{†12}

アクション・インテグラル: $0.25 \times 10^6\text{ A}^2\text{s} \pm 20\%$

ピークの 1% までの総持続時間: $500\text{ }\mu\text{s}$ 以下

10% → 90% の立ち上がり時間: $25\text{ }\mu\text{s}$ 以下

波形: 単方向、もしくは振動性

^{†11} コンポーネント C (持続電流) の 200 C の電荷量は表 4 に示した LPL I の長時間雷撃の電荷量 Q_{LONG} と、 $0.25\sim 1.0\text{ s}$ の持続時間は表 4 の長時間雷撃の時間パラメータ T_{LONG} の 0.5 s と整合している。

^{†12} コンポーネント D (後続雷撃電流) の 100 kA のピーク電流は表 4 に示した LPL I の後続雷撃のピーク電流の 50 kA よりも高い。波形の時間パラメータは、表 4 の $0.25\text{ }\mu\text{s} / 100\text{ }\mu\text{s}$ に対して $25\text{ }\mu\text{s} / 500\text{ }\mu\text{s}$ 以下となっており、大きく異なっている。

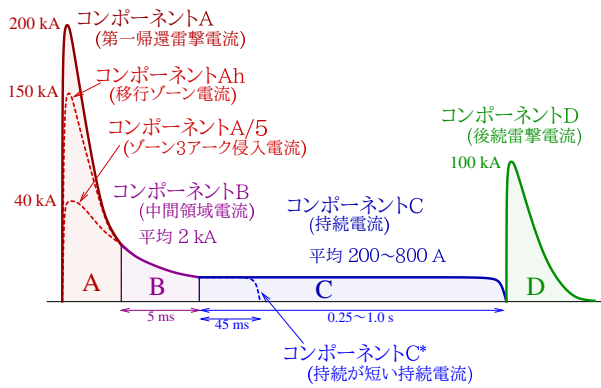


図 7: 雷撃電流のモデル

高電流物理損傷試験で雷撃電流のどのコンポーネントを適用するかは、表3と図6に示すように、カテゴリ (§2.1) によって異なる。

試験に際して、これらのコンポーネントは個別に、あるいは組み合わせて印加される。^{†13}

カテゴリ	高電流波形						
	A	A _h	A/5	B	C*	C	D
1A	✓			✓	✓		
1B	✓			✓		✓	✓
1C		✓		✓	✓		
2A				✓	✓		✓ [†]
2B				✓		✓	✓ [†]
3N			✓	✓	✓		

† コンポーネント D を最初に印加

表 3: 雷の直接的な影響 — 高電流物理損傷試験 — 高電流コンポーネント

2.3.2 アーク侵入試験

アーク侵入試験は直撃雷に曝されるかも知れない機器の雷撃電流の注入に伴う損傷の評価に用いられる。

燃料関係のコンポーネントについては、発火源の検出のための追加の試験 (§2.3.4) も適用される。

また、直撃雷を受けた時に回路上に生じるかも知れない過渡電圧が懸念される場合、回路上の電圧を監視しながらの試験を追加で行なう。

^{†13} 図6のように組み合わせて印加した方が実際の雷撃の影響を良く模擬できるであろうが、この規格ではコンポーネントを個別に印加することが許容されている。これらのコンポーネントを組み合わせたの印加に対応した試験システムについては、例えば [11] で述べられている。

2.3.3 試験セットアップ

1. 供試品をテスト・フィクスチャに取り付ける。
テスト・フィクスチャは実際の設置を代表するものとし、試験計画書で規定する。
2. 発生器のリターン側を試験計画書に従ってテスト・フィクスチャに接続する。
3. 電極の露出した導電性の部分が供試品の評価すべき領域の 50 mm 以上上となるように、また電極の非導電性の部分が供試品から 25 mm 以上離れるように、試験電極を配置する (図8)。
4. 必要の場合、供試品の特定の場所にアークを飛ばすように直径 0.1 mm 以下の細い金属線 (役割を果たした後、蒸発する) を用いても良い。
5. 検出や記録のための機材をセットアップする。

2.3.3.1 試験手順

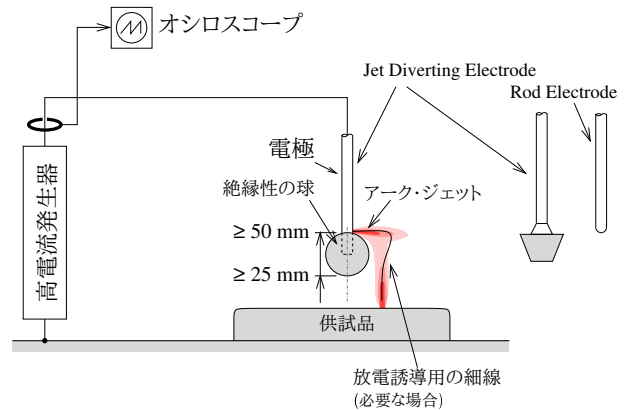


図 8: 雷の直接的な影響 — 高電流物理損傷試験 (アーク侵入試験) — 試験セットアップの例

1. 環境条件を記録する。
2. 安全上の手続きをレビューし、実施する。
3. 高電流発生器^{†14}、放電回路、及び検出/記録機器を確認する:

^{†14} 高電流発生器の写真は、例えば [12] の Fig. 2 を参照。

- (a) 確認時の放電が供試品に損傷を与えないように、電極の下のテスト・フィクスチャにダミーの供試品を取り付けるか実際の供試品の上に導電性のバーを置く。
- (b) テスト・フィクスチャカバーを発生器のリターン側に接続する。
- (c) 電流波形を測定しながらダミーの供試品やバーへの放電を発生させる。
- (d) 電流のレベルか波形が正しくないならば、発生器のパラメータを調整する。
- (e) 必要な電流のレベルと波形を得られるまでこの作業を繰り返す。
- (f) ダミーの供試品かバーを取り除き、供試品をテスト・フィクスチャに取り付ける。

4. 供試品への放電を行なう。
5. 供試品を確認して結果を文書化する。
6. 必要な場合、電極の位置を変え、上記の作業を繰り返す。

2.3.3.2 結果の解釈

供試品は試験後も意図したように機能しなければならない。

表面のある程度の溶融などは想定範囲内であって許容できると判断されるかも知れないが、想定外の、あるいは想定範囲を超える損傷を生じた場合は別途検討が必要となりそうである。

2.3.4 追加の試験要求

給油口キャップや磁気燃料レベル計などの燃料関連の機器は、200 μJ 以上のエネルギーの着火源 (例えば金属のキャップと機体のあいだでの火花放電のような) を生じないことの確認も求められる。^{†15}

この確認の方法としては、

- 写真法 — 暗室中での高電流試験中に所定の感度の機材で撮影を行ない、スパークの発生の有無を判別する

^{†15} 航空機で用いられる燃料と空気の混合物の最小着火エネルギーは 2 mJ 程度と考えられる。勿論、雷撃そのものは遥かに大きなエネルギーを持つが、通常は雷撃の経路には燃料蒸気などの発火のリスクの高い物質は存在しないと考えられる。

- 引火性混合物 (可燃ガス) 試験法 — 着火エネルギーが 200 μJ となるように調整した水素/酸素/アルゴン混合ガス中で高電流試験を行ない、着火の有無によって判別する

の 2 つが定められている。

3 補足

3.1 参考: 雷電流のパラメータ

IEC 62305-1^[7] で示されている LPL (雷保護レベル) I の雷電流のパラメータを表 4 に示す。

3.2 参考: 雷雲から大地への雷放電の発生

雷雲から大地に向けての雷放電は、典型的には次のように発生する (図 9):^[6]

1. 雷雲からの先駆放電 (リーダー) が大地に向けて伸びる。

この先駆放電 (ステップド・リーダー) は折れ曲がったり分岐したりしながら段階的に進み、その速度はかなり遅い。

また、先駆放電の電流は小さく、発光は弱い。

2. 先駆放電が大地に接近して大地付近の電界が高まると大地から捕捉放電 (ストリーマ) が発生し、先駆放電に向かう。
3. 先駆放電と捕捉放電が結合して放電路が形成されると、大地から雷雲に向けて帰還雷撃が発生する。

帰還雷撃は 10 万 km/s 程度の非常に早い速度で進み、また短時間で大きな電荷を運び、激しい雷鳴や雷光を伴う。

第一帰還雷撃は、高電流物理損傷試験 (§2.3.1) ではコンポーネント A で代表される。

4. 最初の帰還雷撃の後、10~100 ms 程度の休止の後、再び雷雲からの先駆放電が発生する。

この先駆放電 (ダート・リーダー) は先の放電で大気中に形成されたイオン化された経路を辿り、最初の先駆放電 (ステップド・リーダー) よりも高速に、連続的に進む。

電流パラメータ		記号	単位	値
第一正極性雷撃	電流波高値	I	kA	200
	短時間雷撃の電荷量	Q_{SHORT}	C	100
	比エネルギー	W/R	MJ/ Ω	10
	時間パラメータ	T_1/T_2	$\mu\text{s}/\mu\text{s}$	10/350
第一負極性雷撃	電流波高値	I	kA	100
	平均波頭峻度	di/dt	kA/ μs	100
	時間パラメータ	T_1/T_2	$\mu\text{s}/\mu\text{s}$	1/200
後続雷撃	電流波高値	I	kA	50
	平均波頭峻度	di/dt	kA/ μs	200
	時間パラメータ	T_1/T_2	$\mu\text{s}/\mu\text{s}$	0.25/100
長時間雷撃	長時間雷撃の電荷量	Q_{LONG}	C	200
	時間パラメータ	T_{LONG}	s	0.5
雷放電	電荷量	Q_{FLASH}	C	300

表 4: 雷電流パラメータの最大値 (IEC 62305-1:2010^[7] LPL I)

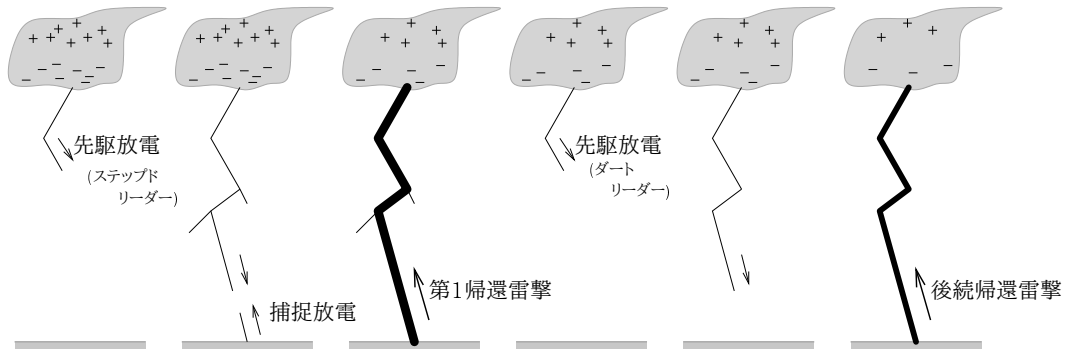


図 9: 対地放電 (雲-大地) の発生

5. 先駆放電が大地に達すると、再び大地から雷雲に向けて帰還雷撃が発生する。

後続帰還雷撃は、高電流物理損傷試験 (§2.3.1) ではコンポーネント D で代表される。

6. 後続帰還雷撃は、しばしば 2~30 回程度繰り返される。^{†16}

7. 帰還雷撃の後、数百 A の電流が 2~300 ms 程度持続するテール電流が発生することもある。

テール電流は、高電流物理損傷試験 (§2.3.1) ではコンポーネント C で代表される。

放電は、大地から雲に向けて、また雲と雲のあいだで発生することもある。

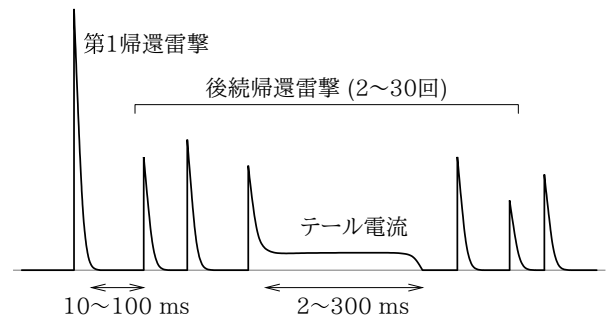


図 10: 多重雷のイメージ

航空機の機体は大気よりも電流を流しやすく、雷が活動している領域を航空機が飛行する時、しばしば機体を通過するような形での放電 (例えば雲と機体前部、そして機体後部と大地のあいだでの放電) が生じる。また、雷雲の近くやその中を飛行する航空機自身がしばしば雷放電の引き金となる。

^{†16} 負極性雷の多くは後続放電を伴い、正極性雷の多くは後続放電を伴わない。^[10]

4 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
- [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] *Avionics Indirect Lightning*, Jay Patel (HV TECHNOLOGIES, Inc.), 2016,
<http://site.ieee.org/rockrivervalley/files/2016/03/D0160-S22-Presentation.pdf>
- [6] 雷保護と接地マニュアル — IT 社会のアキレス腱, ピーター・ハッセ 他 著, 加藤幸次郎 他 訳, 2003, ISBN: 978-4501110901
- [7] IEC 62305-1:2010, *Protection against lightning — Part 1: General principles*
 (JIS Z 9290-1:2014, 雷保護 — 第 1 部: 一般原則)
- [8] *Polymer composite for antistatic application in aerospace*, Ramdayal Yadav et al., Defence Technology Volume 16, Issue 1, February 2020,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914719300108>
- [9] *The Lightning Discharge (International Geophysics Series Volume 39)*, Martin A. Uman, 1987, ISBN: 0-12-708350-2
- [10] *The Lightning Flash*, Vernon Cooray, 2014, ISBN: 978-1-84919-691-8
- [11] *Development of a High-Current Generator to Comply with Aircraft Lightning Environments and Related Test Waveforms*, Nobuyuki Kamihara et al., Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 48 No. 4 (December 2011),
<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e484/e484051.pdf>
- [12] *Effect of hygrothermal aging on the damage characteristics of carbon woven fabric/epoxy laminates subjected to simulated lightning strike*, Yichao Li et al., 2016,
 DOI: [10.1016/j.matdes.2016.03.030](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.030)
- [13] 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
 - 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