

落雷現象と電気機器の被害とその対策

目 次

| | Page |
|-----------------------------|------|
| 1. 落雷現象 | 1 |
| 1-1 雷雲の発生 | |
| 1-2 雷放電の過程 | |
| 1-3 雷の種類 | |
| 1-4 雷撃の種類 | |
| 1-5 雷雲日数 | |
| 2. 雷被害 | 4 |
| 2-1 電力線、通信線に侵入する雷 | |
| 2-2 家電機器の雷被害 | |
| 3. 雷の侵入経路 | 6 |
| 3-1 誘導雷 | |
| 3-2 直撃雷による大地電位上昇 | |
| 3-3 屋内配線への電磁誘導 | |
| 3-4 雷サージの侵入流出経路 | |
| 4. 電気機器の雷被害発生メカニズムと保安器による対策 | 9 |
| 4-1 雷被害発生メカニズムとその対策 | |
| 4-2 保安器の保護効果 | |
| 4-3 保安器の接地 | |
| 4-4 雷対策が必要な設備と対雷対策例 | |
| 5. J I Sにおける雷保護の考え方 | 15 |
| 5-1 雷保護システム構成 | |
| 5-2 雷保護領域(LPZ) | |
| 5-3 雷インパルス波形 | |
| 5-4 保安器の主な性能 | |

1. 落雷現象

1-1 雷雲の発生

雷雲の最も一般的なものは積乱雲で、上層大気と下層の大気とが不安定な層を構成する場合に生じる。雷雲モデルを図1に示す。積乱雲中では、高温多湿の激しい上昇気流が存在し、数千メートルの上空では大気中の水蒸気は断熱膨張し、凝結、氷結がおこる。この過程で、あられ、ひょう、氷晶が形成されるが、それぞれの粒子の温度差に起因する電荷分離がおこる。

この結果、温度差の高い氷粒（あられ、ひょう）は負に、温度の低い氷晶は正に帯電し、重力と上昇気流により分離され、雷雲の上層は正、下層は負の電荷分布を生ずる。

この雷雲内に生じた正および負の電荷が互いに放電することによっておこる電光を雲間放電といい、雲底にある負の電荷とその負の電荷によって地表面上に誘起された正の電荷の間でおこる電光を対地放電という。この対地放電が一般に言う落雷現象である。

なお、冬の雷において、図2のように雷雲が風に流されて、正の電荷と大地との間で対地放電が発生する場合もあり、落雷は必ずしも負の帯電によるものとは限らない。

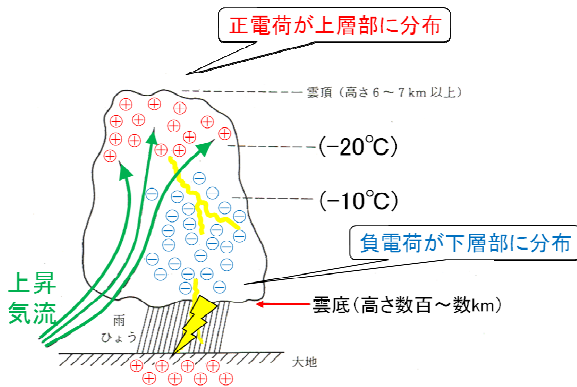


図1 雷雲モデル

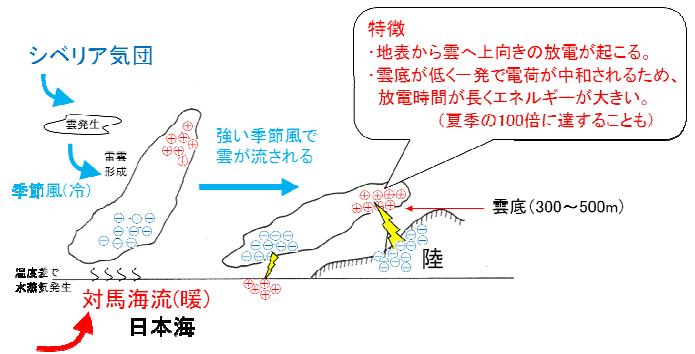


図2 北陸等で見られる冬季雷

1-2 雷放電の過程

雷放電現象は、特殊カメラ (Boys Camera) により雷放電進展過程が撮影され、解明されている。雷放電は図3に示すように、まず雲底から大地へ向かって先駆放電 (階段型先駆放電) が $50 \mu s$ の時間間隔で断続的に放電路が形成されることに始まる。

先駆放電の先端が大地表面近くまで到達すると、大地より雲底へ向かって放電が開始され、先駆放電により放電路を高速の $1/2 \sim 1/10$ 程度の速度で雷撃電流 (帰還雷撃) が上昇し、放電路に分布された負電荷を中和する。

通常の雷放電では、この帰還雷撃が終了した後、約 $50 \mu s$ 程度の時間において、再び同一放電路を通して先駆放電 (矢型先駆放電) が雲底から大地へ向かって生じ、これが大地に達すると再び帰還雷撃が生じる。

このように、同一放電路を通して反復される雷放電を多重雷撃という。

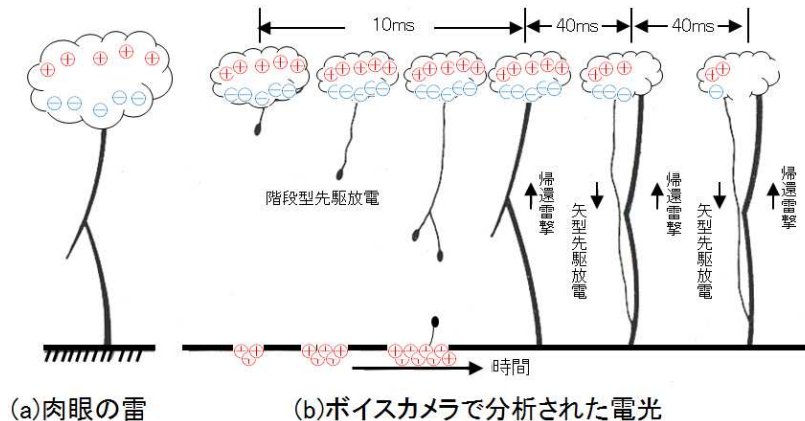


図3 雷放電の進み方

1-3 雷の種類

雷は、前述の積乱雲によるもの以外にも、種々の原因によって発生するが、それらを表1に示す。

表1 雷の種類

| | |
|-------------|---|
| 熱雷 | 夏期、強い日射によって地面が過熱され気塊が激しく上昇してできた積乱雲に発生する雷。(図4) |
| 界雷 (前線雷) | 主に寒冷前線付近の強い上昇気流に伴って発生する雷。(図5) |
| 熱的界雷 | 熱雷と界雷の両方の原因が重なって起こる雷。 |
| 渦雷 | 発達した低気圧や台風の中心部の激しい上昇気流に伴って生じる雷。 |
| 火山雷 | 火山噴火の際、噴煙中に発生する雷。 |

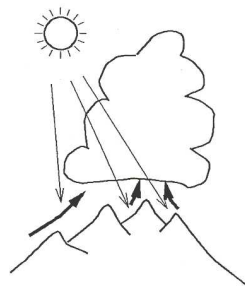


図4 熱雷

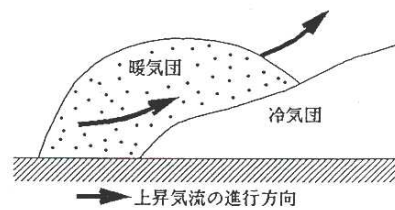


図5 界雷

1-4 雷撃の種類

落雷には、大きく分類して直撃雷と誘導雷がある。

(1) 直撃雷

電気設備・人体、その他の物体に雷撃が直撃することを呼ぶ。人命を奪う、機械設備を破壊する火災を発生させるなど、甚大な被害を引き起こします。

(2) 誘導雷

近くに落雷した際に拡散するエネルギーに電磁界が大きく乱されることにより発生する。電源線・通信線やアンテナなどに雷電流からの電磁誘導によって発生する高電圧で、機器の破壊を引き起こします。



図6 直撃雷

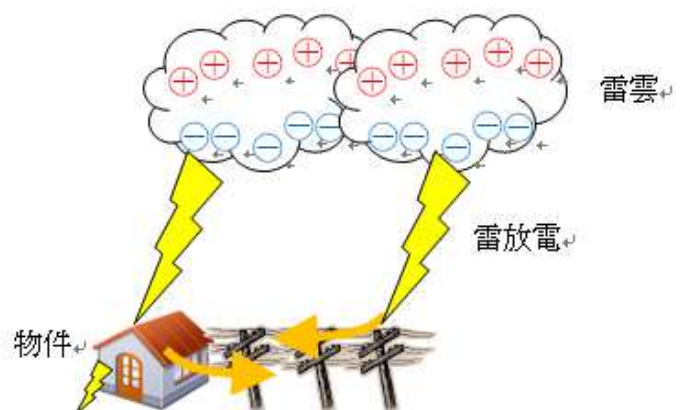


図7 誘導雷

1-5 雷雨日数

雷鳴が確認された日を雷雨日といい、気象庁によって報告される。また1年間の雷雨日数を年間雷雨日数（IKL）と呼び、昭和29年～昭和38年の10年間にわたる年間雷雨日数を図8、最近の年間雷雨日数（昭和56年～平成22年の30年間）をまとめた気象庁のデータを図9に示す。

我が国では多雷地において1年間に30～40日雷が発生することがわかる。

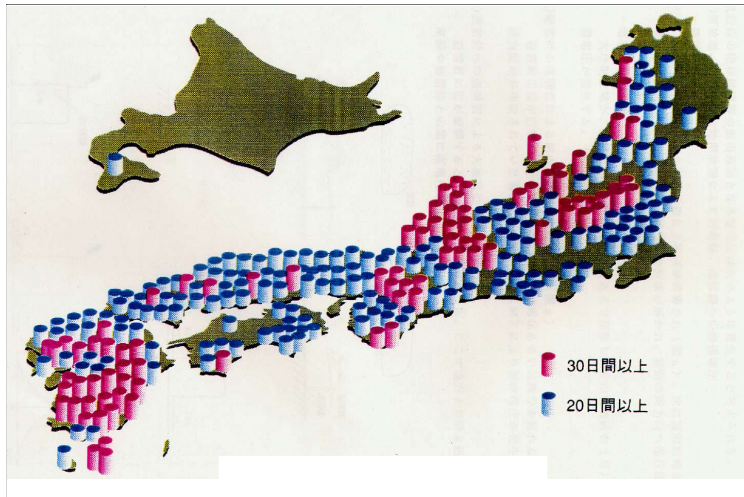


図8 年間雷雨日数分布図（IKL 1954～1963年平均）

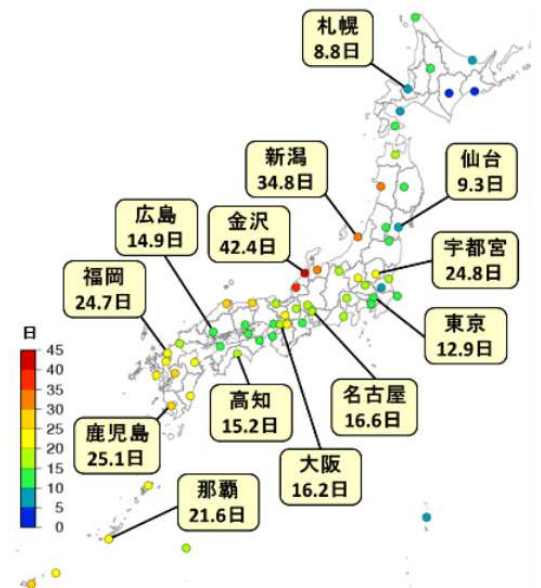


図9 気象庁のデータ（1981～2010年まで平均）

2. 雷被害

2-1 電力線、通信線に侵入する雷

(1) 低圧配電線に発生する雷過電圧、雷サージ電流

図10は低圧配電線に発生する雷過電圧波高値の発生頻度、図11は高圧配電用避雷器の接地線及び低圧避雷器のリード線に流れる雷電流の波高値を測定した結果である。（東京電力株式会社殿により観測）

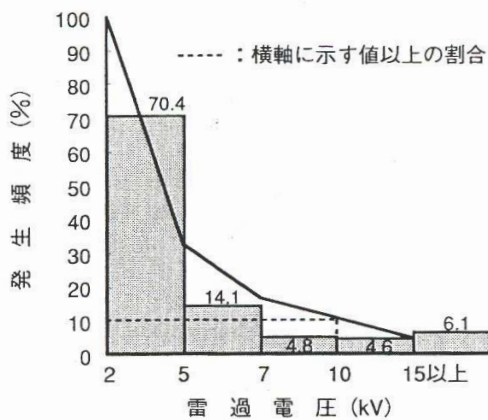


図10 低圧配電線の雷過電圧の電圧別発生頻度（1981～1987）

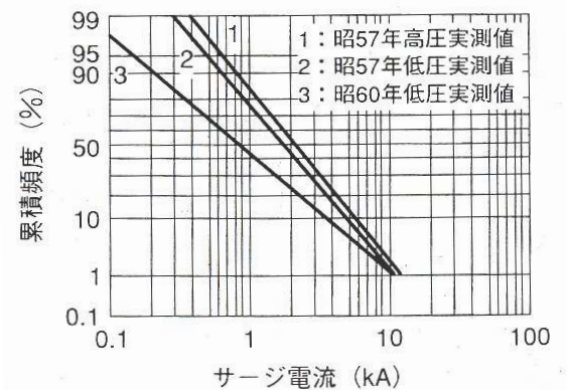


図11 サージ電流実測値分布

2-2 家電機器の雷被害

アンケート調査により夏期雷の多い群馬県（高崎周辺）と冬季雷の多い秋田県、山形県の日本海沿岸地区および石川県金沢地区の一般家庭を対象に過去に雷被害を受けた状況に関してアンケート調査結果を図 12 に示す。また、家電機器の使用区分別被害割合を図 13 に示す。

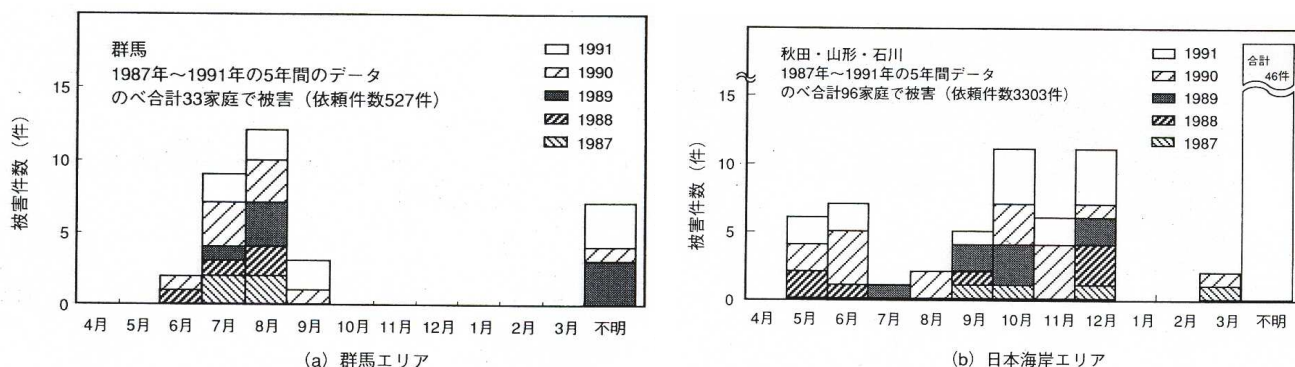


図 12 アンケート調査から得た被害家庭件数

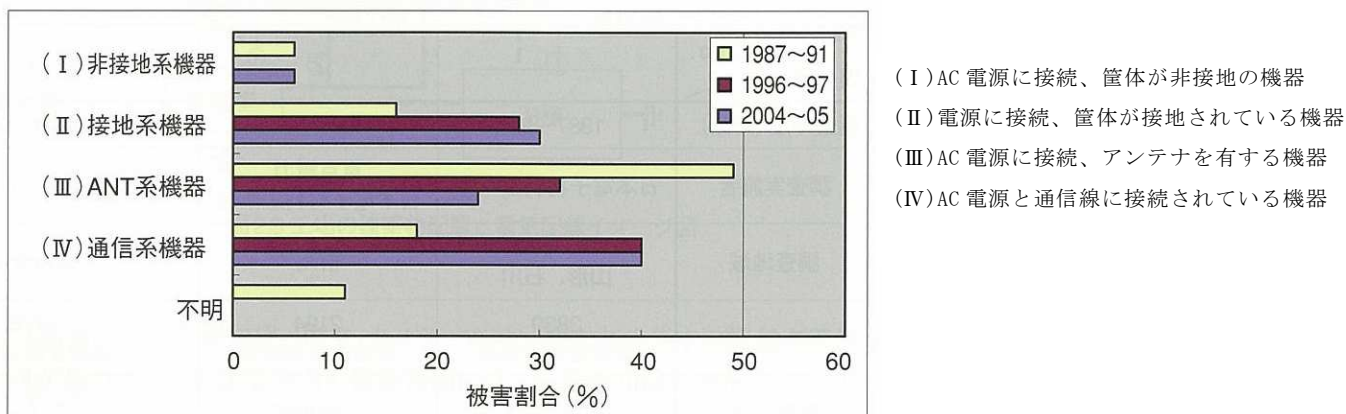


図 13 家電機器の使用区分別被害割合
(日本雷保護システム工業会 雷害対策設計ガイドより)

3. 雷の侵入経路

電気設備の絶縁破壊等の損傷原因となる雷電圧は次のように電気機器に侵入してくる。

3-1 誘導雷（静電誘導、電磁誘導）

電源線、通信線等は、架空に長く張り巡らされている。

この近傍に雷雲から直撃雷があると、電源線、通信線等には静電的結合(図 14(a))、あるいは電磁的結合(図 14(b))により雷電圧が発生する。この電圧が機器に侵入してくる。

高圧配電線に発生した雷電圧が、低圧側に侵入してくる原因は次の通りである。

- ・ 変圧器の静電容量を介して低圧側に侵入(図 14(c))

雷電圧は最大数MHzの高周波成分を含んでいる。そのため、変圧器の1次側(高圧側)から2次側(低圧側)に静電容量を介して侵入してくる。

- ・ B種接地から侵入(図 14(d))

変圧器の2次側(低圧側)にはB種接地が施されている。1次側(高圧側)には避雷器があり、その避雷器が動作した場合、避雷器の接地極(EA(LA))に雷電流が流れ、その付近の電位は上昇する。電位上昇によりB種接地の電位も上昇し、低圧側に雷電圧が侵入する。

(雷電圧 V_L が機器のラインと筐体間に印加される。)

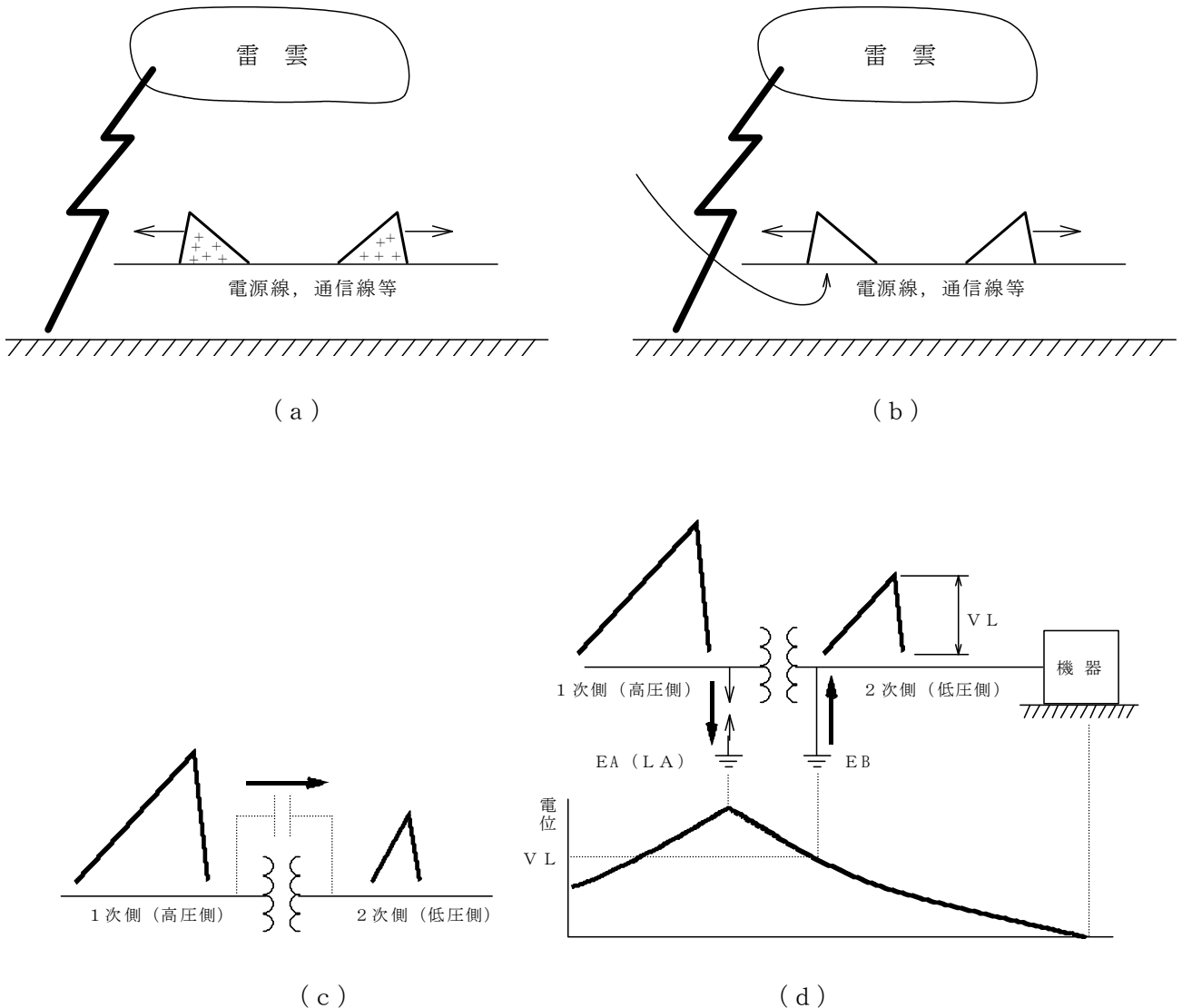


図 14 誘導雷の発生と電源線からの侵入

3-2 直撃雷による大地電位上昇

建物の避雷針に直撃雷があると、雷電流は引下導体あるいは鉄筋等の構造体を經由し大地へ流れる。そのため、建物自体が遠方に対して非常に高電位となる。(図 15)

通常、電源線、通信線は遠方より引き込まれているため、構造体と電源線、通信線との間にその電位差が加わることになる。

(機器の筐体とライン間に電圧 V_0 が印加される。)

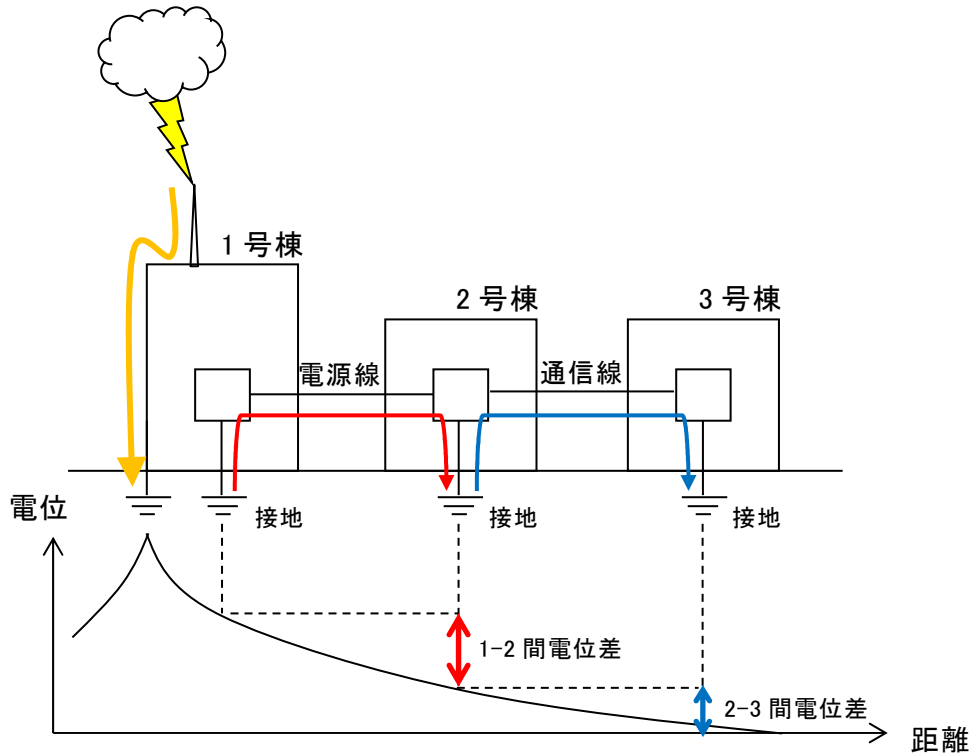


図 15 大地電位上昇による雷電圧の発生

3-3 屋内配線への電磁誘導

建物内には、電源線、通信線、信号線等が複雑に配線されている。これらの配線は、接地、機器を介してループを形成していると考えられる。このような建物、あるいは近傍に直撃雷があり、雷電流が流れた場合、ループとの電磁結合により、ループの開放端である機器には誘導雷電圧が発生する。

(図 16)

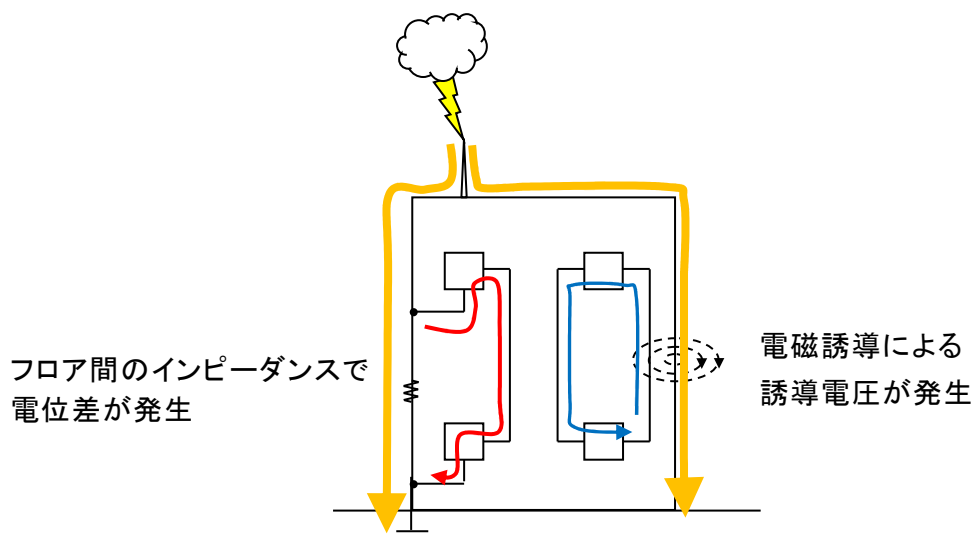


図 16 屋内配線への電磁誘導

3-4 雷サージの侵入流出経路

建築物等への落雷(直撃雷)想定位置および落雷時に屋外の配電線などに誘起する雷サージの建築物内への侵入経路を図 17 に示す。

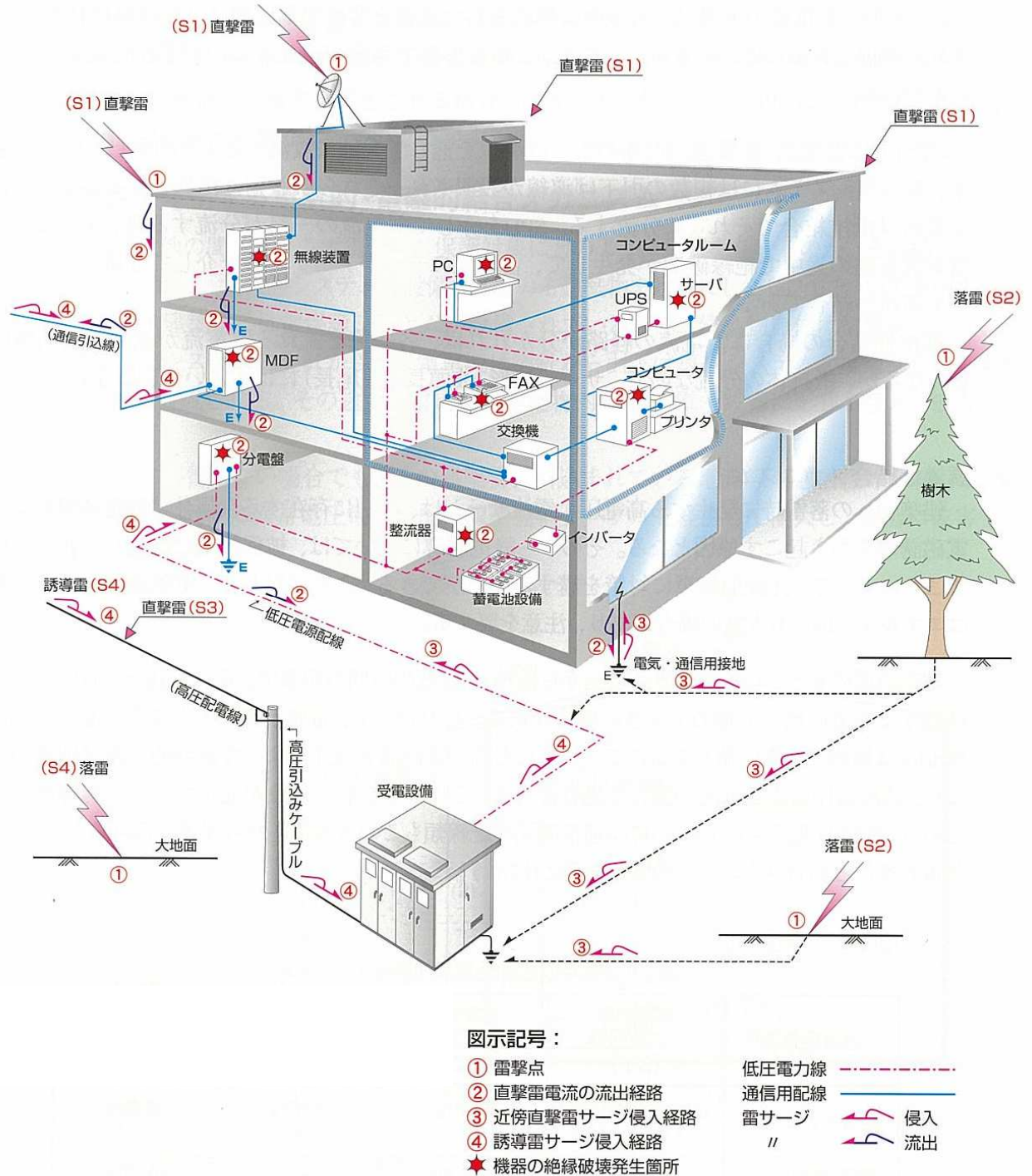


図 17 雷サージの侵入流出経路

(日本雷保護システム工業会 雷害対策設計ガイドより)

4. 電気機器の雷被害発生メカニズムと保安器による対策

4-1 雷被害発生メカニズムとその対策

雷サージは、図 18 のように機器に接続されているライン（電源線、通信線等）および接地線から侵入してきます。

図 19 のように雷サージ電圧はライン（ V_n ）と大地間（ V_{C1} , V_{C2} ）にかかり、絶縁を破壊した場合に機器が損傷すると考えられます。また、雷サージには高周波成分も含まれているため、絶縁破壊に至らなくても、機器内部に高周波電流が流れ、機器損傷に至る場合もあります。

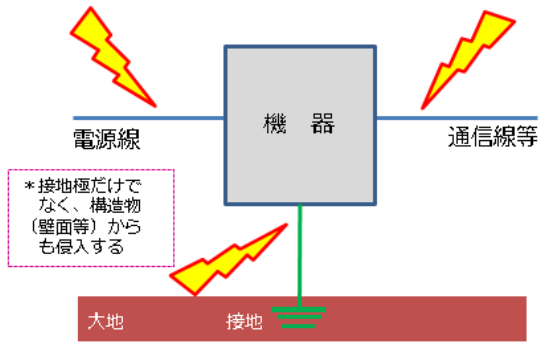


図 18

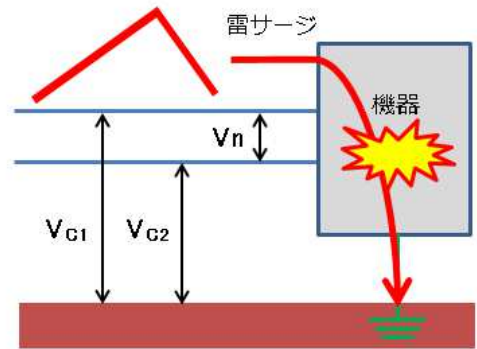


図 19

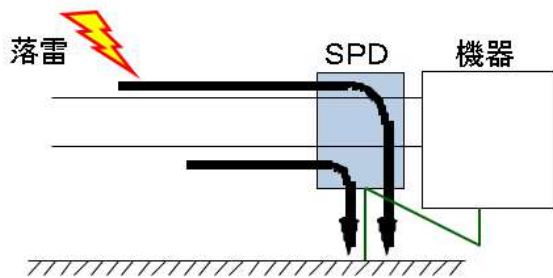


図 20

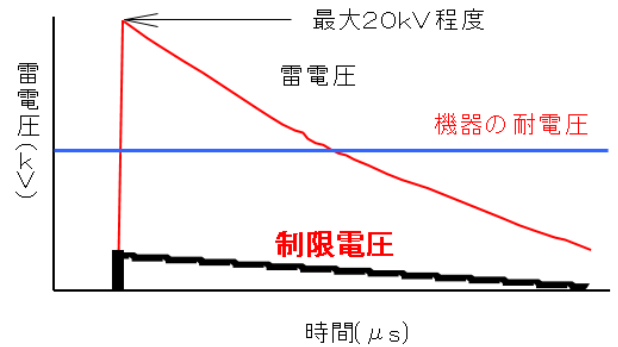


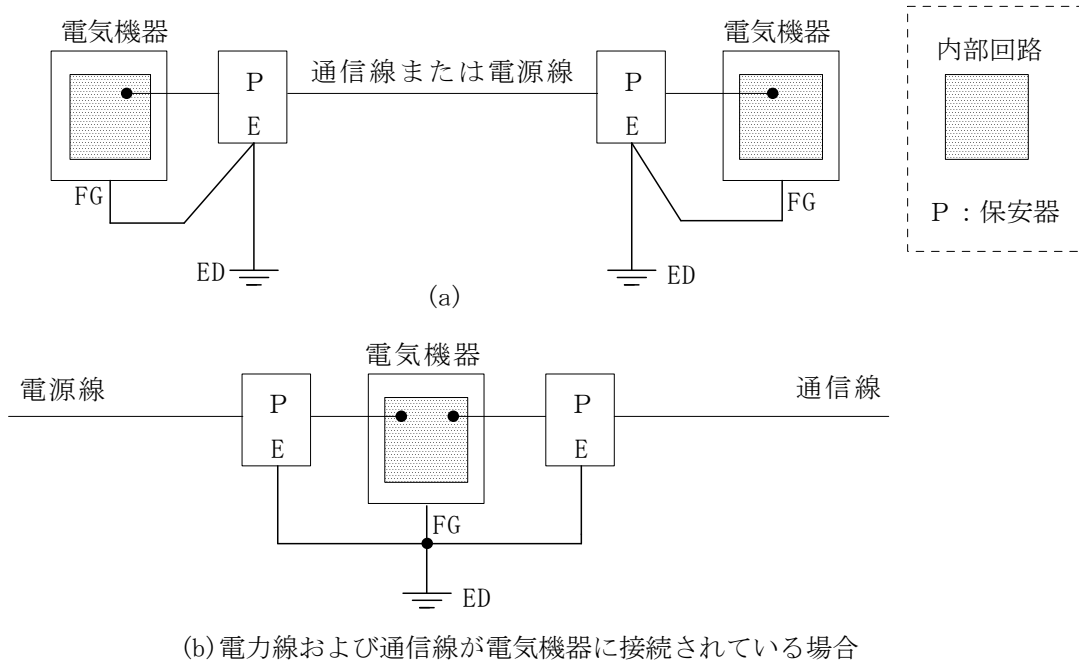
図 21

図 20 のように保安器を設置することにより、この雷電圧を機器の耐電圧以下に制限し、機器を保護することができる。

雷電圧波形（誘導雷）と保安器による制限電圧波形例を図 21 に示す。

最近では避雷素子を内蔵した機器もあるが、線路間に設けられているものがほとんどで、エネルギーの大きな対地間の雷サージには効果がないため、ケースと内部回路間で絶縁破壊が発生して機器破損が発生する。

そこで、電源や信号の仕様に合ったサージ耐量の大きな保安器を機器の入出力部に設け、接地を電気機器の筐体接地と接続する対策が必要となる。これにより、内部回路と筐体(FG)間の電圧が低減でき、また図 22(b)のような場合、電源線と通信線間に発生する雷電圧も低減できる。



4-3 保安器の接地

(1) 単独接地と連接接地

保安器の接地において単独接地と連接接地は図 26 に示すような差があり、連接接地でないと保護できない場合が多い。

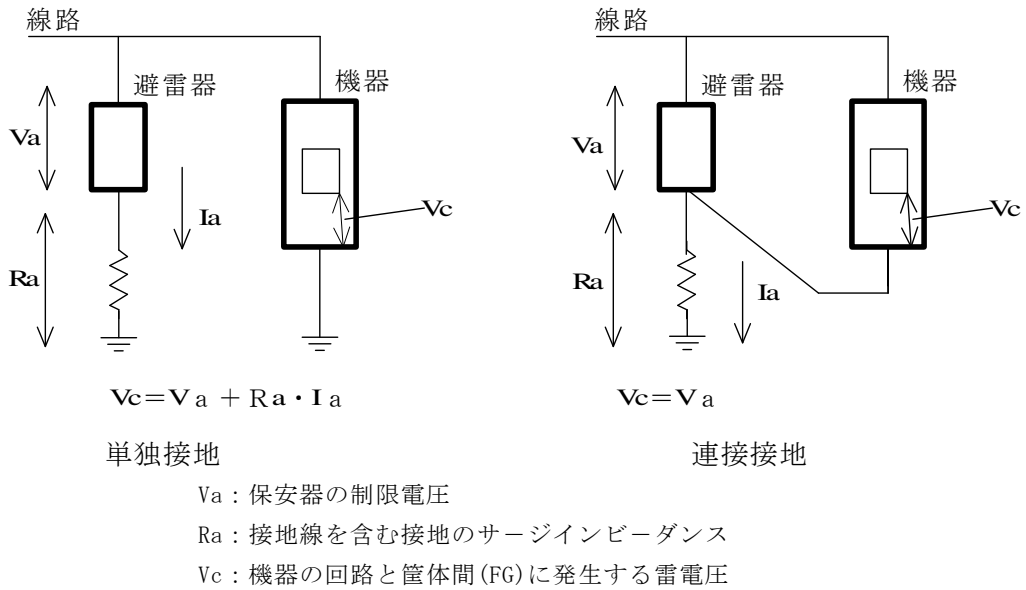


図 26

(2) 接地線の配線

接地線は図 27 (a) のように、できるだけ短く直線的に配線する。

(b) や (c) のように接地線を長く引き回したり、コイル状にすると保護効果が小さくなる。

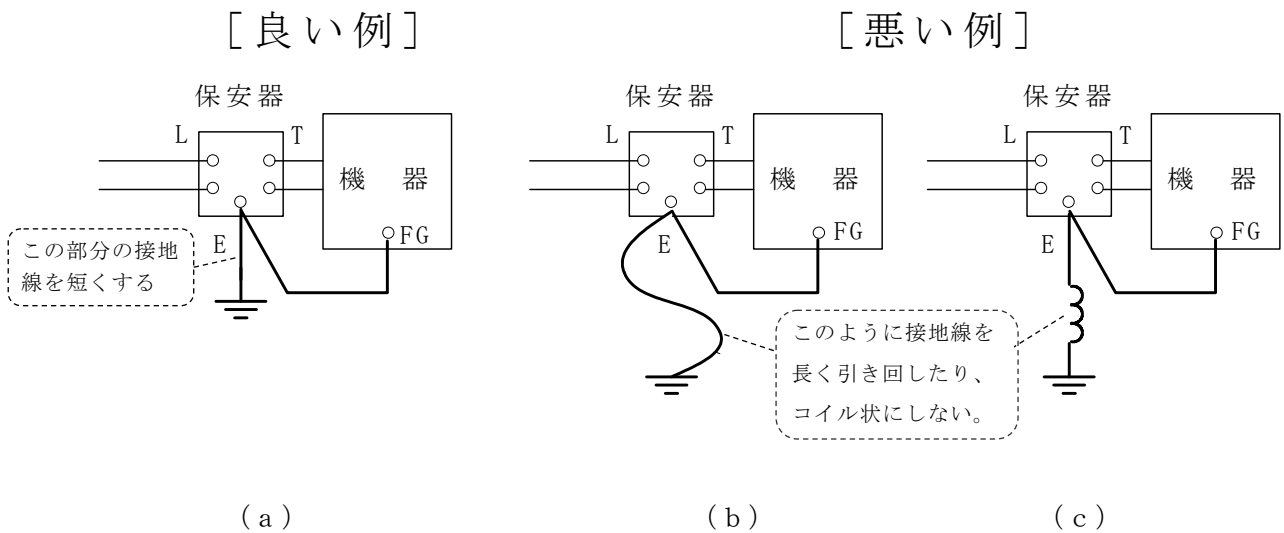


図 27

(3) 保安器の接地線による影響

接地線の接続状況により、保護対象機器に加わる雷電圧が大きく変わる。

図 28 の試験回路により、図 24 の雷電圧を保安器に印加した結果、渡り接地線の接続位置の違いにより保護対象機器に加わる電圧は図 29 となる。

これより、渡り接地線はできるだけ保安器の接地端子に近い位置に接続することが好ましい。

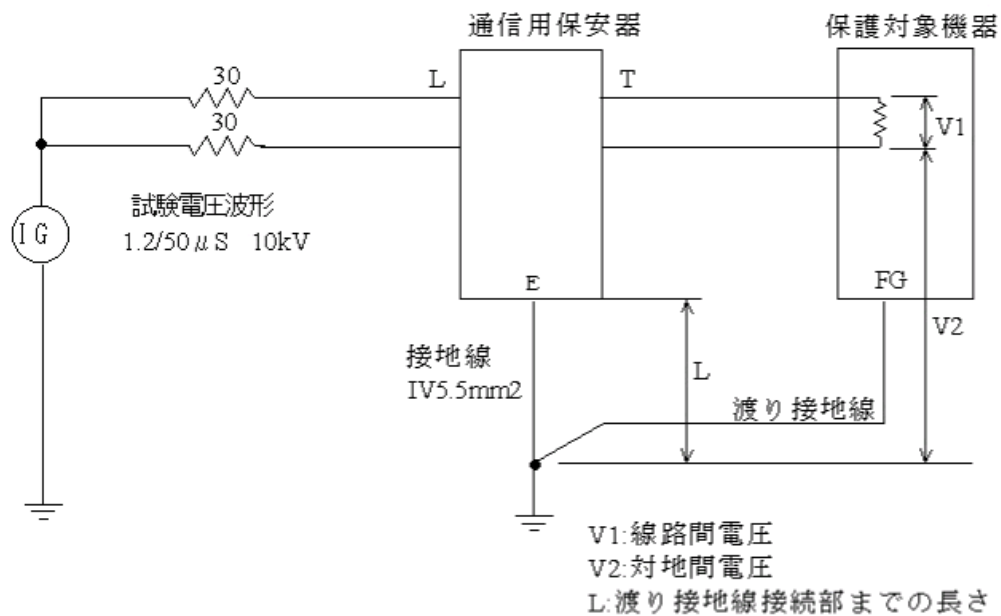


図 28 試験回路

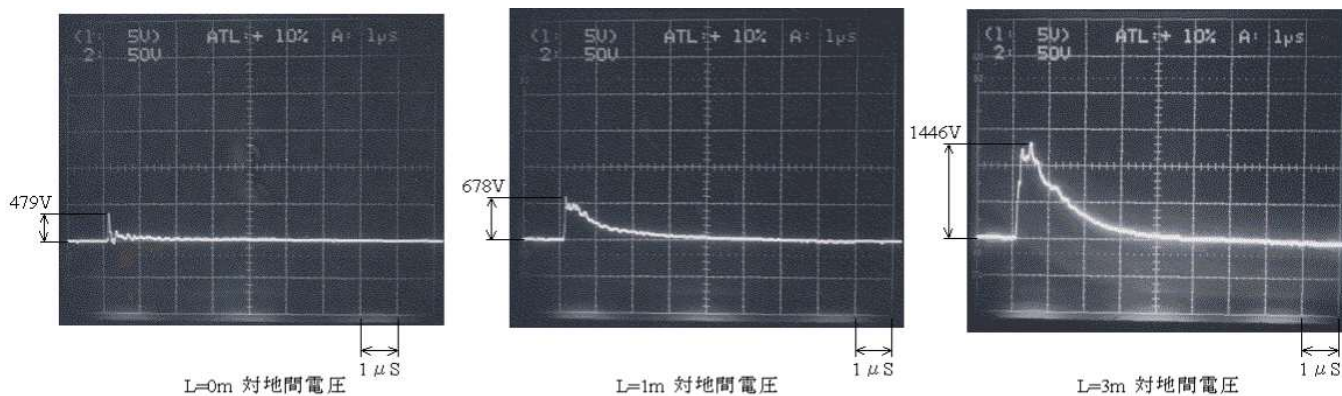


図 29 対地間電圧波形

4-4 雷対策が必要な設備と対雷対策例

(1) 雷対策が必要と思われる箇所

- ① 雷の多い地域の設備
- ② 受電設備の変圧器の2次側（低圧側）または低圧受電の場合の幹線
- ③ 受電地点から距離のある別棟等へ配線される低圧幹線（※）
- ④ P B Xや放送設備のように電源と通信線、電源と信号線等2種類以上のラインを持ち、さらにその通信線や信号線の配線距離が長い設備のP B X、主装置。また、距離の長い別棟へ配線されている設備の端末機側（※）
- ⑤ 高層の建物に設置される、P B Xや放送設備のように電源と通信線、電源と信号線等、2種類以上のラインを持つ設備のP B X、主装置。
- ⑥ コンピュータシステムのように、特に重要な機器、高価な機器。

※ 距離の長い配線は、架空配線と地中配線があるが、どちらの場合もその距離が問題となる。地中配線の場合は誘導を受けにくい、近傍に直撃雷があった場合の電位上昇による雷電流の通過経路となるため、その両端の機器は雷被害を受けやすくなる。

(2) 各種設備の対雷対策例

各種設備の対雷対策例を図30に示す。

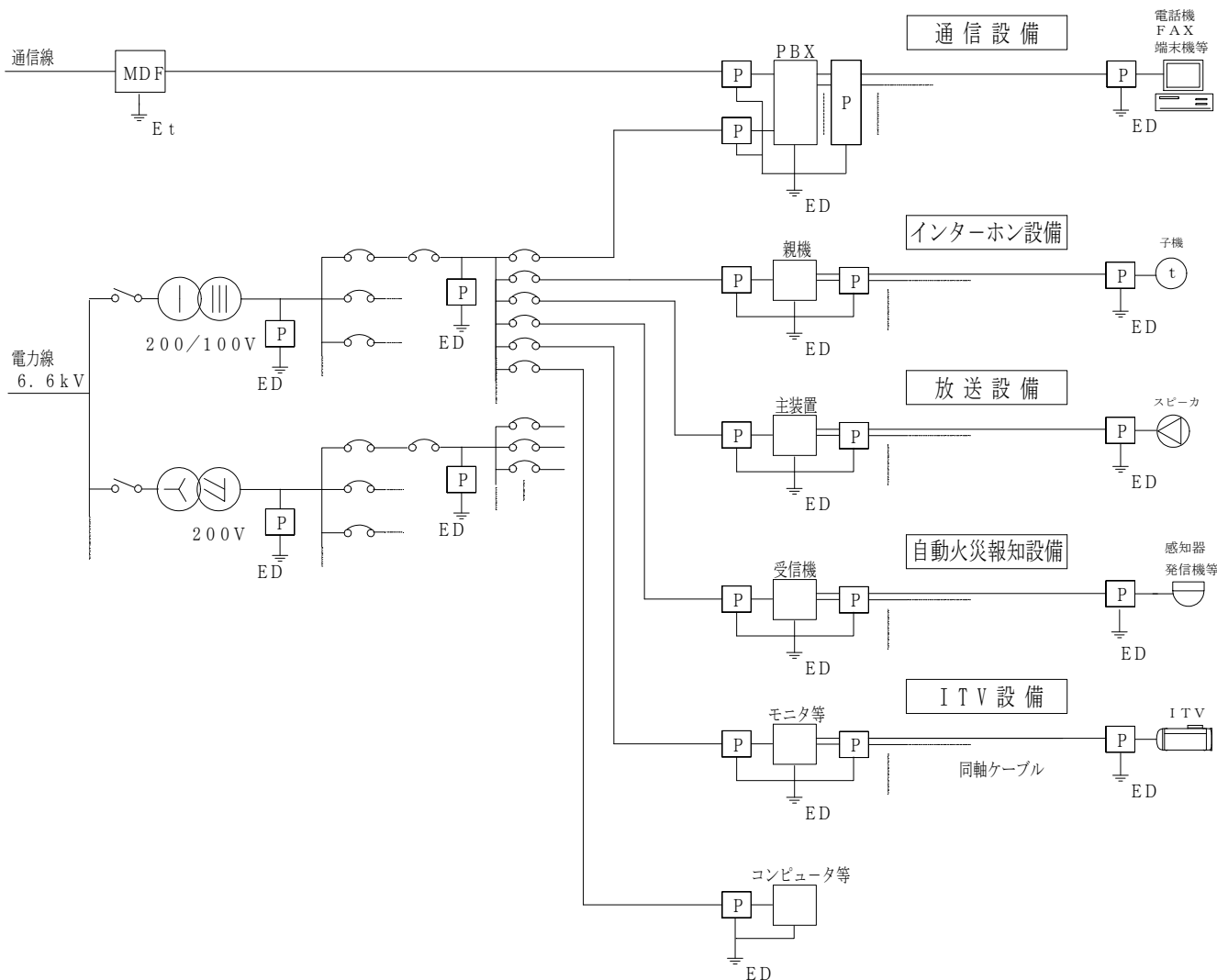


図30 対雷対策例

5. JIS における雷保護の考え方

5-1 雷保護システム構成

(1) 外部雷保護システム

直撃雷による火災や破壊など、直接的な被害を防ぎ、建物内部への雷サージの影響を低減する。
(JIS A 4201 2003 避雷針設備)

(2) 内部雷保護システム

避雷器等を用いて等電位ボンディングを行い、建物内において雷サージによる電磁的影響を低減する。

【SPD に関する主な JIS】

JIS C 5381-11 2014

低圧配電システムに接続する低圧サージ防護デバイスの要求性能及び試験方法

JIS C 5381-12 2014

低圧配電システムに接続する低圧サージ防護デバイスの選定及び適用基準

JIS C 5381-21 2014

通信及び信号回線に接続するサージ防護デバイスの要求性能及び試験方法

JIS C 5381-22 2007

通信及び信号回線に接続するサージ防護デバイスの選定及び適用基準

5-2 雷保護領域 (LPZ)

雷による電磁インパルス (LEMP) の強さの異なる領域を図 31 のように定め、その脅威を段階的に低減させるように表 2 のように雷保護領域を設け、保護する手法。

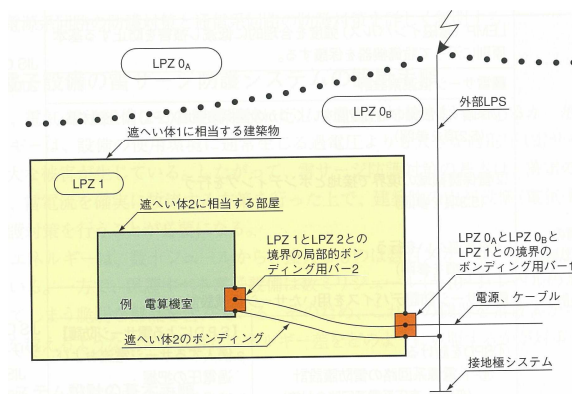


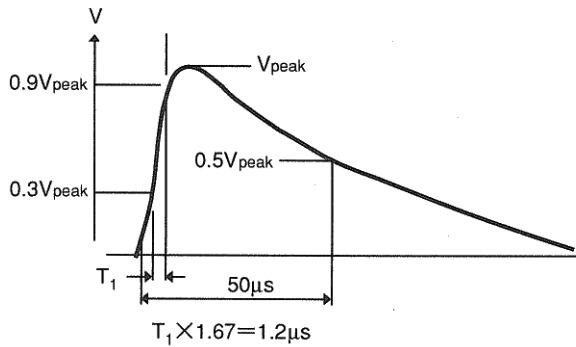
図 31 建築物を幾つかの LPZ に分割し、適切にボンディングを施した例
(日本雷保護システム工業会 雷害対策設計ガイドより)

表 2 雷保護領域の定義

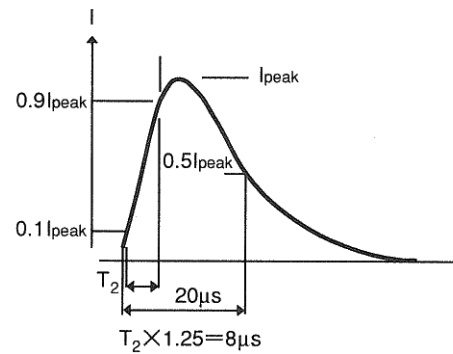
| 区分 | 定義 |
|--------------------|---|
| LPZ 0 _A | 直撃雷を受ける可能性があり、この場所に設置された設備は全雷電流が流れる。雷電流による電磁界は減衰しない。 |
| LPZ 0 _B | 直撃雷を受ける可能性はないが、雷電流による電磁界は減衰しない。 |
| LPZ 1 | 直撃雷に対して保護されている領域で、LPZ 0 _B に比べサージ電流は低減し、電磁界も磁気遮へいにより低減可能。 |
| LPZ 2 | 電流および電磁界が磁気遮へいにより LPZ 1 に比べ更に低減を図ることが可能。 |

5-3 雷インパルス波形

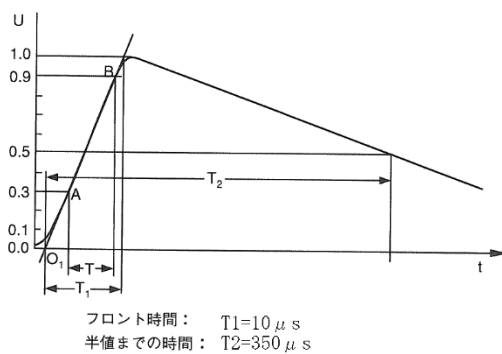
① 雷インパルス電圧波形 1.2/50 μ s



② 雷インパルス電流波形 8/20 μ s (誘導雷電流)



③ 雷インパルス電流波形 10/350 μ s (直撃雷電流)



直撃雷電流のエネルギーは、
誘導雷電流の 20 倍

図 35 雷インパルス波形

5-4 保安器の主な性能

(1) 電源用保安器

① 最大連続使用電圧 U_c

保安器に連続して印加しても良い最大実効値で定格電圧と等しい。

② 試験クラスおよび放電電流

クラス II : 試験インパルス電流の波形は 8/20 μ s で、誘導雷対応として適用される。多数回の雷サージ対応としての公称放電電流 I_n と稀に発生する雷サージ対応の最大放電電流 I_{max} で表示する。

③ 電圧防護レベル U_p

保安器の端子間に加わる最大制限電圧を示し、保護機器のインパルス耐電圧以下の保安器を採用する。

(2) 通信用保安器

① 最大連続使用電圧 U_c

伝送特性等に影響を与えない電圧値。DC または AC で規定する。

② 電圧防護レベル U_p

雷サージで動作した時に制限する性能。

③ インパルス耐久性

インパルスに対する耐久性を確認する試験であり、各カテゴリで分類される。

例 カテゴリ C2 (開回路電圧 1.2/50 10kV、短絡回路電流 8/20 5kA)