

誘導雷サージの発生メカニズムと対策

Analysis of and Countermeasures for Induced Surge Voltages Caused by Nearby Lightning Strokes

松田 純一* ・ 山本 拓也*
Jun-ichi Matsuda Takuya Yamamoto

誘導雷サージの発生メカニズムの解明において、事故例の解析から大地電位上昇による接地間電位に特定して誘導雷サージを考えることができることを示すことによってその対策を提案する。また対策事例として、電源回路基板においては ZnO バリスタとギャップ式アレスタを組み合わせた保護回路、太陽光発電システムにおいては各機器の接地を共通に接続することでそれぞれ雷サージから保護されていることを紹介する。

In the analysis of the generation mechanism of induced surge voltages, effective protection measures were proposed after analyzing accident cases and verifying that the induced surges are attributable to a potential difference between the groundings. The examples of countermeasures shown here include a protection circuit combining ZnO varistors and a gap-based arrester for a power circuit board, and the use of a single common grounding for all related units of a solar generation system, including a solar cell panel.

1. ま え が き

日本国内における年間の雷被害総額は 2000 億円に達すると試算¹⁾されている。日本の接地方式は、AC 配電系の接地と一般機器の接地が分離されている TT 接地である。この接地方式は地絡電流が小さいという特徴があるが、両者の接地が共通となっている欧米の TN 接地に比べ大きな誘導雷サージ電圧が各機器に侵入するため、誘導雷サージ対策は必須である。

電気製品を開発設計する者および雷被害の原因究明とその対策を行う者にとって雷サージの侵入経路と大きさを推定して的確な対策を講ずることは重要な課題である。

従来、雷サージは機器に接続されるすべての接続線を介して侵入すると想定されていた。したがって、雷サージの解析や対策を進める場合、たとえば雷サージが通信線から侵入して接地に抜けていくとするなど、まずその経路を想定する。このため、設計者は何本もの入出力線に対して場合分けを行って対策を考える必要があった。また、誘導という語句から電磁的な結合で侵入してくるというイメージが先入観としてあり、対策検討を複雑なものにしてきた。

そこで筆者らは、誘導雷サージ電圧を複数接地により生じる接地間電位に特定して考えることを提案する。そうすることにより、接地間電位に対する対策は従来の経路によ

る場合分けに基づく雷対策と等価となる。本稿では、まず接地間電位から見た雷対策を示し、次に雷被害を受けた回路基板の事例とシステム製品の対策事例について報告する。

2. 雷サージの侵入経路

雷には、直撃雷とその 2 次的な発生電圧による誘導雷がある。本稿では誘導雷を扱い、以下の記述で雷サージと記した場合、誘導雷サージを意味している。

2.1 従来の考え方

図 1 に雷侵入経路の従来事例を示す。4 箇所が侵入経路として説明されている。

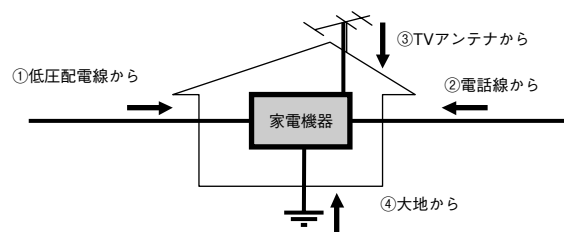


図 1 雷サージ侵入経路の従来事例

雷サージの発生メカニズムとしては諸説あり、これまで検討されてきた代表的な三つの説²⁾を図 2 に示す。

* (株) 松下電工解析センター Matsushita Electric Works Analysis Center Co., Ltd.

(1) 拘束電荷説 (図 2 (a))

雷雲の電荷に引き寄せられ拘束された電荷が、雷雲内での放電で拘束を解かれ、雷サージとなるというものであるが、現在では、この説は否定されている³⁾。

(2) 電磁誘導説 (図 2 (b))

低インピーダンスのループに雷サージ電流を誘起するというものである。これは磁界による誤動作要因にはなると考えられるが、本稿が扱う電気製品の絶縁破壊を引き起こす雷サージ電圧を発生する要因にはならない。

(3) 大地電位上昇説 (図 2 (c))

送電線や避雷針への直撃雷が大地の電位を上昇させる。この電位上昇により、異なる接地の間に電位が発生するというものである。

筆者らの提案は、この考え方に基づいており、雷サージが接地を通して大地に流れ込むことで接地電位が上昇するという説とは異なる。

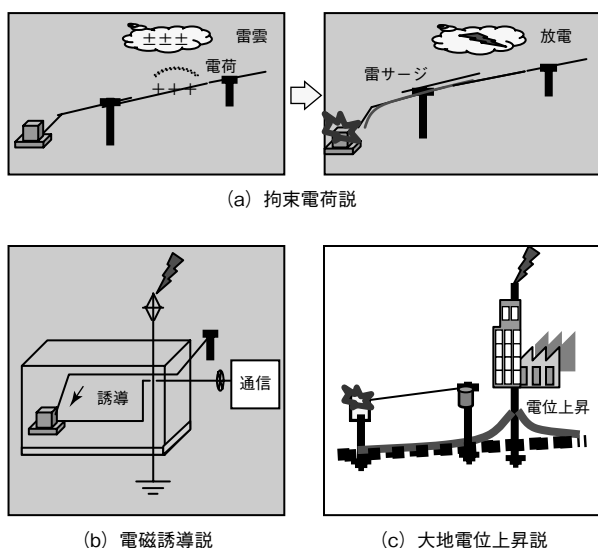


図2 雷サージの発生メカニズム

2.2 本稿での考え方

図3に示すように直撃雷により大地電位が上昇すると、その近傍の接地間には電位差が発生する。誘導雷は、B種接地された電源線と筐体の接地との間にサージ電圧として掛かることになる。これは、電気機器から見ると電源線とアース間に発生するサージ電圧であり、一般的にはコモンモードサージと称されている。

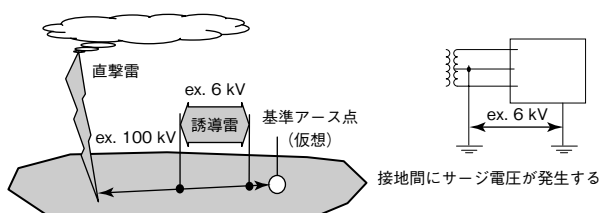


図3 誘導雷の発生

このような大地での電位差の発生は、接地抵抗があること、鉄塔から送電線に放電する逆フラッシュオーバー現象があること、大地で感電する歩幅電圧があることなどで知られている。

3. 雷サージ対策

3.1 接地間電位差から見た対策

3.1.1 被害機器の共通点

雷被害に遭う機器は、少なくとも2箇所で大地につながっている。1箇所はB種接地されている商用電源であり、もう1箇所としては、TVやVTRの場合はアンテナが雨で濡れるなどして大地に接地すること、電話、FAXの場合は保安器で大地に接地すること、あるいはエアコンディショナの場合は室外機のアース線によって大地に接地することが挙げられる。図4は、従来から説明されている雷侵入経路に接地線を記入したものであり、雷サージは接地間に発生する電位として見ることを示している。

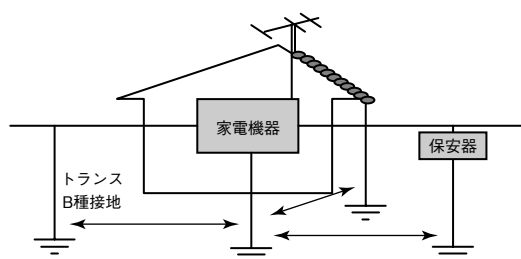


図4 接地間電位から見た雷サージ侵入経路

3.1.2 対策方法の共通点

接地間電位を抑える方法としては、機器の異なる接地間を避雷器などのサージ保護素子でサージ電圧をバイパスする方法と機器を接地から切り離す方法の二通りがある。

電源回路に避雷器を挿入した場合、保護すべき機器のアースはこの避雷器の接地に接続しなければならない。図5に避雷器による保護事例を示している。

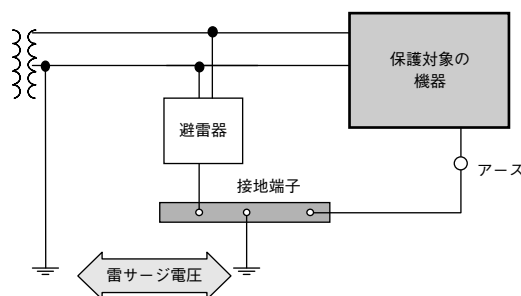


図5 避雷器による雷サージ対策

これによって機器に掛かるサージ電圧は避雷器によってバイパスされる。また、機器の中のコモンモード保護もサージ電圧をバイパスする構成となっている。たとえば、電話

機では通信線の保護回路と電源線の保護回路のアースを接続するバイパス回路構成で保護されている。さらに、建築設備の接地工事として採用が推奨されている共用接地や連接接地などは等電位化してサージ保護するとされている。これらも接地間に発生する電位差をバイパスするものである。

一方、通信を行う電気機器は離れた接地に接続される場合が多く、バイパス保護は困難である。このため、接地から切り離す対策法が採用される。耐雷トランスと称されるものは耐ノイズ性に優れた絶縁トランスで、この耐雷トランスを電源に設置するのが一方法である。また、通信ラインを光で絶縁するのも一方法である。

3.2 回路基板の対策

3.2.1 電源回路基板の損傷事例

雷被害に遭った機器の多くは電源回路基板が損傷しており、この部位について調査した。図6に示すように異なる接地間に発生する雷サージをバイパスする回路構成になっていたにもかかわらず、基板上で絶縁破壊を生じた。これはZnOバリスタと基板の絶縁破壊レベルの協調がとれていなかった可能性があるため、それぞれのレベルを確認する。

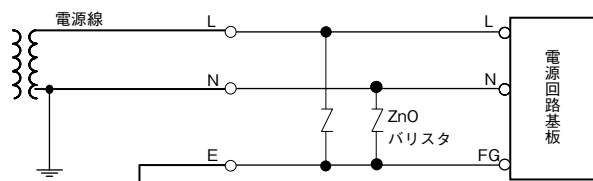


図6 ZnOバリスタによる保護

3.2.2 基板の絶縁破壊レベル

2台の電源基板に対し、接地間であるN-E（FG）間に雷サージ電圧を印加して絶縁破壊レベルを確認したところ、パターン間のギャップ約2.5 mmで2.8 kV前後のサージで破壊した。表1に印加電圧と基板パターン上での絶縁破壊電圧の結果を示す。図7はこのときの基板上の放電痕である。なお、試験装置はコンビネーション波形発生器を使用し、試験条件は、電圧波形1.2 / 50 μ s、出力抵抗12 Ω である。また、測定装置はソニーテクトロニクスTDS420 Aと電圧測定プローブP3000（1000 : 1）、電流測定用1.62 m Ω 無誘導同軸シャントである。

表1 基板パターン上での絶縁破壊レベル

サンプル	印加電圧	絶縁破壊	サージ電流
No.1	2 kV	なし	0 A
	3 kV	2.76 kV	177 A
No.2	2 kV	なし	0 A
	3 kV	2.84 kV	168 A



図7 雷サージ試験での放電痕

回路基板は各製品規格に基づいて絶縁距離が確保されている。しかし、この絶縁距離は使用電圧とインパルスカテゴリから決められるインパルス耐電圧に対する最小空間距離であり、絶縁距離だけでは雷サージ電圧に対して耐えられないため、サージ保護素子の動作レベルを確認する。

3.2.3 保護素子の動作レベル

ZnOバリスタでは電流1 mA通電時の制限電圧が定格バリスタ電圧である。数十Aから数百Aになる雷サージ電流がバリスタを流れて制限電圧が上昇し、基板の絶縁破壊レベルを超えた可能性がある。そこで、雷サージ電流を流したときの制限レベルを確認する。

試験装置はコンビネーション波形発生器を使用し、電圧波形1.2 / 50 μ sで出力抵抗は12 Ω と2 Ω を使用する。

測定装置は、ソニーテクトロニクスTDS420 A、電圧測定プローブP3000（1000 : 1）、および電流測定用1.62 m Ω 無誘導同軸シャントである。試験サンプルは ϕ 14-1800 Vバリスタ、 ϕ 10-470 Vバリスタ、およびこの二つの直列使用である。

表2は、1800 VのZnOバリスタへの印加電圧と制限電圧の結果であり、サージ電流の大きさが制限電圧に影響を与えていることがわかる。サージ電流の違いは試験機の出力抵抗の違いによる。図8に試験時の制限電圧波形を示している。下段の波形はサージ電流波形である。

表2 ϕ 14-1800 Vバリスタの制限電圧

印加電圧	出力抵抗	制限電圧	サージ電流
2 kV	12 Ω	1.94 kV	5 A
3 kV	12 Ω	2.18 kV	59 A
4 kV	12 Ω	2.30 kV	128 A
3 kV	2 Ω	2.38 kV	202 A
4 kV	2 Ω	2.62 kV	519 A

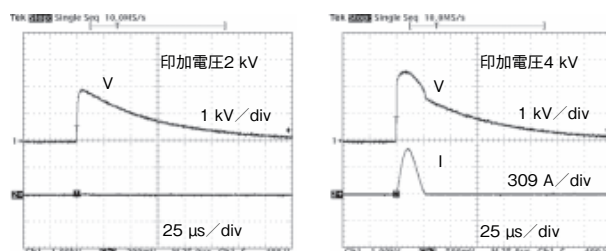


図8 ϕ 14-1800 Vバリスタの制限電圧波形

機器のコモンモード保護は、AC 耐圧試験で影響を受けないように 2.5 kV 程度の制限電圧が選ばれることがある。また表 3 は 470 V のバリスタの制限電圧、表 4 は 1800 V と 470 V のバリスタを直列に接続使用した場合の制限電圧の測定結果であり、図 9 と図 10 はそのときのそれぞれの制限電圧波形である。ZnO バリスタの定格に対してサージ電流が大きくなると制限電圧が大きくなり、保護できない領域ができる。

表 3 ϕ 10-470 V バリスタの制限電圧

印加電圧	出力抵抗	制限電圧	サージ電流
2 kV	12 Ω	0.65 kV	136 A
2 kV	2 Ω	0.77 kV	667 A

表 4 ϕ 14-1800 V + ϕ 10-470 V バリスタの制限電圧

印加電圧	出力抵抗	制限電圧	サージ電流
3 kV	12 Ω	2.66 kV	20 A
3 kV	2 Ω	2.74 kV	35 A

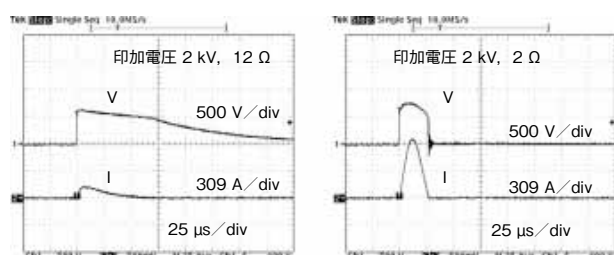


図 9 ϕ 10-470 V バリスタの制限電圧波形

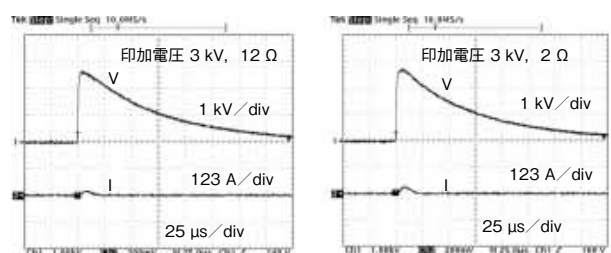


図 10 ϕ 14-1800 V + ϕ 10-470 V バリスタの制限電圧波形

3.2.4 雷対策の改善事例

雷サージ保護のためには基板パターンの絶縁破壊電圧以下に雷サージ電圧を抑えなければならないが、バリスタで保護する場合は、サージ電流による制限電圧の上昇を考慮してバリスタ電圧を選定する必要がある。そこで筆者らは、保護レベルが雷サージ電流に依存しないサージ保護素子としてギャップ式アレスタの保護動作を確認している。図 11 に 1500 V ギャップ式アレスタの制限電圧とサージ電流波形を示す。ブレイクダウン後の制限電圧は、数十 V になる。

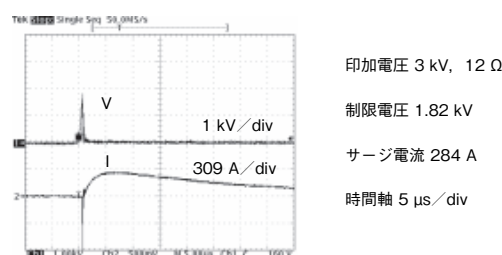


図 11 1500 V ギャップ式アレスタの制限電圧波形とサージ電流波形

ギャップ式アレスタだけでは電源電圧による続流が流れ、地絡に近い状態になる可能性があるため、ZnO バリスタとの直列接続で使用する。図 12 に、1500 V ギャップ式アレスタと 470 V バリスタを直列接続した場合の制限電圧を示す。この制限電圧はギャップ式アレスタのブレイクダウンで決まり、その後はバリスタの制限電圧となる。この組合せの動作は、基板パターンのコモンモード雷サージ保護に適している。

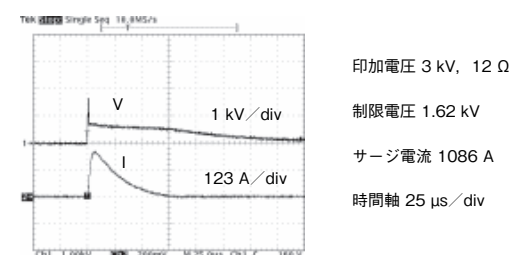


図 12 1500 V ギャップ式アレスタ + 470 V バリスタの制限電圧とサージ電流波形

3.3 システム製品の雷保護

3.3.1 避雷器から入る雷サージ電圧

システム製品では、接地を取るべき箇所が複数になる。このとき接地の場所が異なると図 13 に示すように雷サージ電圧が掛かる箇所が増える。

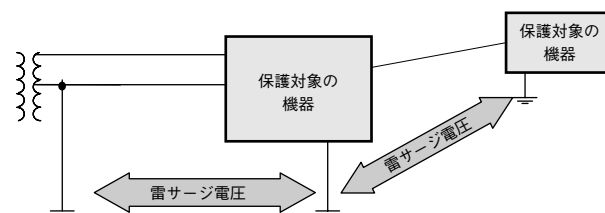


図 13 各アース間に掛かる雷サージ電圧

雷対策の避雷器としてサージ保護素子を挿入した機器において、機器アースとサージ保護素子のアースのそれぞれを独立して接地する場合の雷サージ電圧の大きさを図 14 に示す回路で測定する。ここでは電気機器の絶縁抵抗を模擬した抵抗を挿入し、計測系の入力インピーダンスの影響をなくするため、抵抗値は 1 k Ω とする。

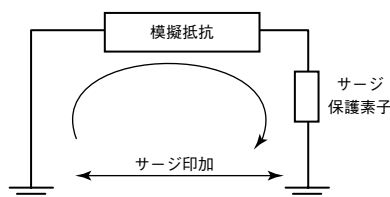


図14 サージ保護素子と抵抗へのサージ印加

このときの測定条件は印加サージ電圧 3 kV とし、サージ保護素子に 1500 V ギャップ式アレスタ、 $\phi 14$ -1800 V と $\phi 10$ -470 V の ZnO バリスタを使用している。測定は抵抗 (1 k Ω) およびサージ保護素子に発生する電圧である。

表5がサージ保護素子と抵抗両端に掛かる電圧である。図15のようにギャップ式アレスタでは印加したサージ電圧のほとんどが機器を模擬した抵抗に掛かっている。また図16、図17に示すように ZnO バリスタでは、印加電圧からバリスタ電圧を差し引いた電圧が抵抗に掛かっている。すなわち、保護すべき機器のアースとサージ保護素子のアースそれぞれの接地を独立にとると、サージ吸収の効果はなく、雷サージ電圧に対して保護できず、逆にサージを引き込む接続になっている。

3.3.2 太陽光発電システムの接地事例

以上の結果から、サージ保護素子でサージをバイパスさせるため接地を一つにまとめて接続する。当社の太陽光発電システムは、パワーコンディショナ、接続箱、太陽電池パネルを搭載した架台から構成され、これらの接地を共通にするよう施工説明書に明記している。太陽電池の出力を受ける接続箱と、直流を交流に変換し系統と連係するパワーコンディショナにはそれぞれ内部にアレスタが組み込まれている。そのため図18に示すように、このシステムでは接地を共通に接続することで雷サージから保護される。

4. 今後の課題

誘導雷を接地間の電位差としてみることは従来からも行われている考え方の一つである。しかし、対象機器や入出力線で場合分けして侵入経路を想定するのではなく、接地間の電位差のみに注目して従来の雷現象解析事例の多くを再評価することで雷保護設計に共通に活用できるデータが抽出できると考える。たとえば、接地端子盤で得られる接地間電位差は、誘導雷電圧のフィールドデータとして活用が期待できる。

接地に関して地絡による電位上昇も重要な解析課題である。ギャップ式アレスタには雷電流と同時に続流が流れる可能性があるため ZnO バリスタと直列で挿入される。たとえば、三相3線 200 V で雷による絶縁破壊で地絡も同時に引き起こされると、同じ B 種接地につながれた単相3線 AC 100 V の接地電位も 200 V に上昇する。バリスタの選定が悪ければ、この 200 V で続流が流れる可能性がある。この続流は地絡電流であり、漏電ブレーカの作動やアレスタ

表5 サージ保護素子と抵抗両端に掛かる電圧

サージ保護素子	抵抗両端電圧	保護素子両端電圧
1500 V ギャップ式アレスタ	2.78 kV	1.82 kV
470 V ZnO バリスタ	2.66 kV	0.58 kV
1800 V ZnO バリスタ	0.98 kV	1.94 kV

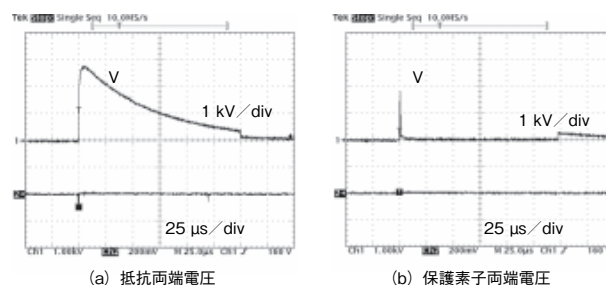


図15 1500 V ギャップ式アレスタと抵抗に掛かる電圧

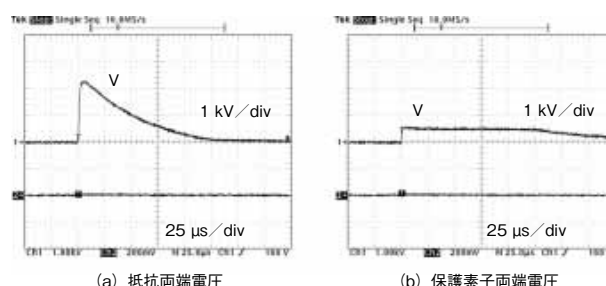


図16 470 V ZnO バリスタと抵抗に掛かる電圧

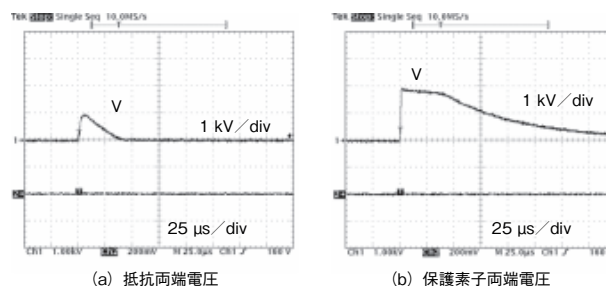


図17 1800 V ZnO バリスタと抵抗に掛かる電圧

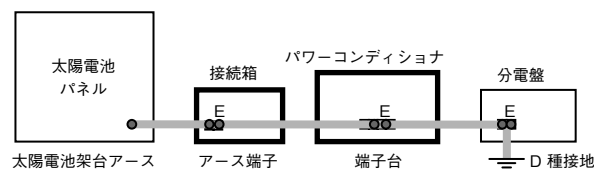


図18 太陽光発電システムの接地

タを破壊する原因となる。漏電ブレーカの誤作動や雷電流によるギャップ式アレスタの破壊とみられているものの多くは、この続流が関係していると考えられる。今後は、雷被害発生時の続流について調査と解析が重要であると考えている。

5. あ と が き

雷サージの発生メカニズムの解明において、事故例の解析から大地電位上昇による接地間電位に特定して雷サージを考えることができることを示すことによってその対策を提案する。また対策事例として、電源回路基板においてはZnOバリスタとギャップ式アレスタを組み合わせた保護回路、太陽光発電システムにおいては各機器の接地を共通に接続することでそれぞれ雷サージから保護されていることを紹介した。

*参考文献

- 1) 高度情報社会の雷害問題の実情と研究課題，電気学会技術報告，第902号，2002年11月，p. 13-18
- 2) 情報機器・弱電機器への雷害事例調査報告書その2，電設技術，平成15年8月号，p. 70
- 3) 架空線における誘導雷現象，電気学会技術報告，第522号，1994年12月，p. 3-4

◆執筆者紹介



松田 純一

(株) 松下電工解析センター



山本 拓也

(株) 松下電工解析センター