

低い接地インピーダンスが得にくい場所での避雷方法

○安本 勝

東京大学大学院工学系研究技術部・原子力国際専攻

概要

低接地インピーダンスが得られない場所では落雷電流による電圧降下が大きくなり、受雷時の放電点（以下、放電点）の電位が上昇する。このため放電点周囲にできる強電界部分が絶縁破壊することで、放電点が移動し、安定な位置を確保できなくなる。本報告は、この対策になる、放電点の移動防止・侵入防止、放電電流路の特性インピーダンスの低減、および誘導電荷の移動制御の各方法についての提案である。

1 はじめに

岩盤地帯での雷対策の検討機会があり、低い接地抵抗が得られない場所での問題点と新たな種々の対策方法について検討を行った。岩盤地帯の接地極や避雷導線のインピーダンスが高い場合、避雷針に落雷しても安定な放電点にならず別の個所に放電点が移動してしまい避雷の機能が果たせないことが考えられる。接地極の接地抵抗が十分低くできない例としては、管理が不適切な場合も生じる問題であり、特殊な立地環境の問題だけではなく一般的な問題でもありと考えている。また、別の現象として、十分低い接地抵抗が得られない山岳地の場合、岩盤上への落雷は、接地抵抗が大きいため、放電点が高電位になり安定な放電点にならず岩盤上を移動する。11名が死亡した西穂高岳落雷遭難事故は、放電点が人の列に移動したことが大きな被害をもたらしたものである。前者に該当する避雷針は放電点を他に移動しないようにする工夫が、一方、後者に該当する岩盤のように接地抵抗が大きい場所では放電点が被保護場所に侵入しないようにする工夫が必要である。また接地インピーダンス以外の問題として高層建築物に独立に設ける避雷導線の特性インピーダンスが一般的に大きく、低くできないため、避雷導線電圧が高くなるという問題がある。色々な条件における安定な放電電位を確保する方法を中心にした対策を提案する。

2 一般的な落雷対策と接地インピーダンス

(1) ステップトリーダが放電点を決める

落雷の最初が雷雲から始まる場合、図1に示すように放電は途中途中、雷雲中から電荷を補給されながら進展する。このステップトリーダが放電

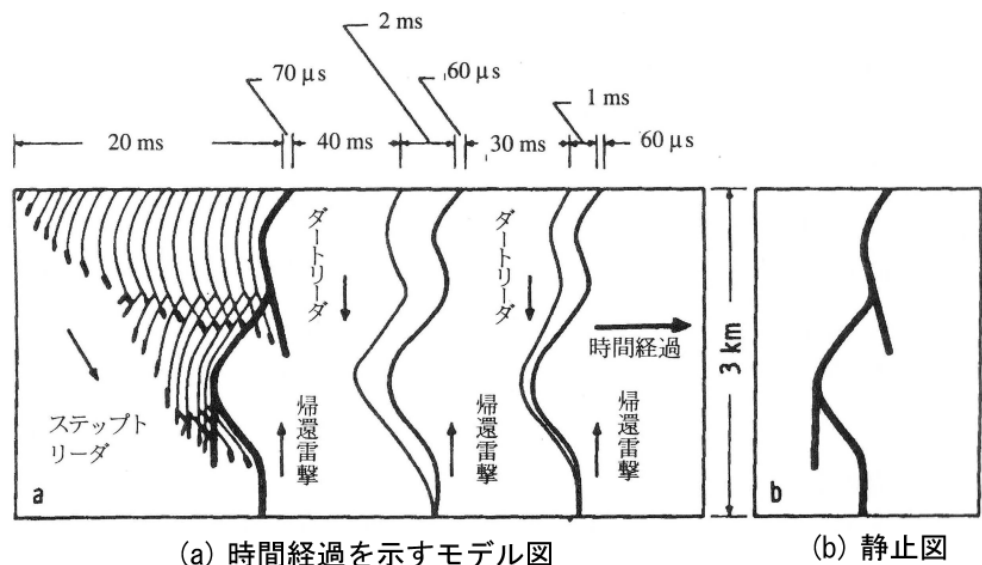


図1 三重雷^[1]

点を決め、大きな帰還電流が流れることになる。放電点到達までの時間は長く数十 ms になる^[1]。基本的な落雷対策

は被保護物がこの放電点にならないようにすることである。避雷針は、積極的に誘雷し、放電点になることで被保護物の被雷を避けるためのものである。

(2) 一般的な避雷方法 一般的な落雷からの保護対策には、表 1 に示すように①回転球体法、②保護角法、③

メッシュ法がある。①、②に示す保護範囲は図 2 になる。それぞれの保護レベル、I～IV に対応し、被保護機器は受雷部の保護範囲に収まるようにする。避雷針等の避雷電極に誘雷させることで、保護範囲にあるものを落雷から保護する方法である^[2]。

(3) 放電点の移動 落雷電流はほぼ定電流源とみなすことができ、そのため落雷電位を下げるためにはできるだけ落雷電流を流す接地線インピーダンスと接地極インピーダンスを小さくすることが必要である。これら電流路のインピーダンスが十分小さくないと放電点の落雷電位が上昇し大気の放電破壊電圧、あるいは放電点周囲表面の沿面破壊電圧を超える高電界を生じると放電点が移動することになる。山岳部の落雷では岩盤のインピーダンスが大きいため放電点は岩盤上をなめるように移動することになる。

因みに、接地極のインピーダンスは土質により影響を受けやすく、岩盤や砂地の場合低い値を得にくい。一般的にも、接地インピーダンスは十分低くしても経年変化があり増加傾向にある。法令許容値を超えることは定期検査で見いだされる場合は多い。

(4) 被雷電流路が長い場合 鉄骨高層構造物の場合、避雷針は鉄骨に接続する 경우가一般的になっている。しかし、建物に雷電流を流すことを嫌う場合には別に雷電流用接地線を設ける場合も多くみられる。このときに落雷電流を流す避雷針専用接地線の特性インピーダンスは、通常の施工方法では大きくなり、避雷導線径と壁面からの距離を考慮すると 100Ω を超える。そのため、高層ビル等雷電流を流す接地線路が長く伝播時間の短いサージ電流である場合、特性インピーダンスによる電圧降下は無視できなくなり、伝播上接地線路に無視できない電圧が生じる場合が推測される。

3 低インピーダンスが得にくい場所の避雷方法

3.1 放電点移動対策

放電路に磁場が加わり電磁力が発生する、あるいは気流等の外力が発生するようになっていれば放電路の移動は可能であり、従って放電点を移動制御させることは可能であると考えてよい。しかし、自然現象であ

表 1 保護レベルに対する受雷部の配置 (JIS A 4201 表 1)

保護レベル	保護効率	回転球体法 R(m)	保護各法[高さ h:(m)]					メッシュ幅 (m)
			20	30	45	60	60 超	
			$\alpha(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	
I	0.98	20	25	*	*	*	*	5
II	0.95	30	35	25	*	*	*	10
III	0.9	45	45	35	25	*	*	15
IV	0.8	60	55	45	35	25	*	20

注* 回転球体法及びメッシュ法だけを適用する。

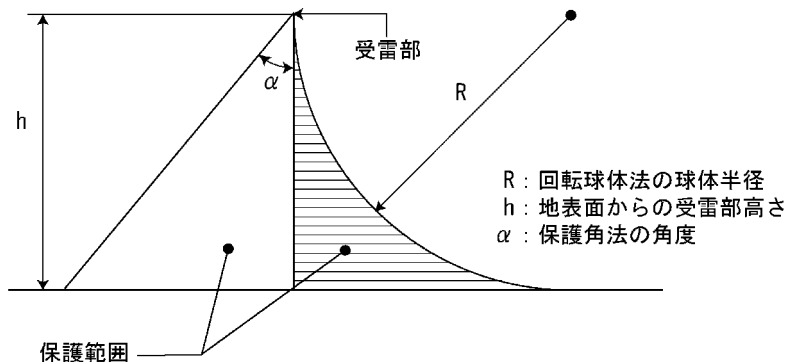


図 2 保護角法および回転球体法による保護範囲 [JIS A 4201 表 1 (付図)]

る落雷放電路にそのような制御力を人為的に加えることは難しい。他の方法として、自己の電流で放電点に絶縁破壊を超える電界が生じることができれば、その電界方向に移動させることができるようになる。従って、放電電流路に、抵抗の電圧降下により意図的に絶縁破壊を超える電界を作ることによって放電点を移動させることができる。

(1) 高インピーダンス接地用避雷針の原理

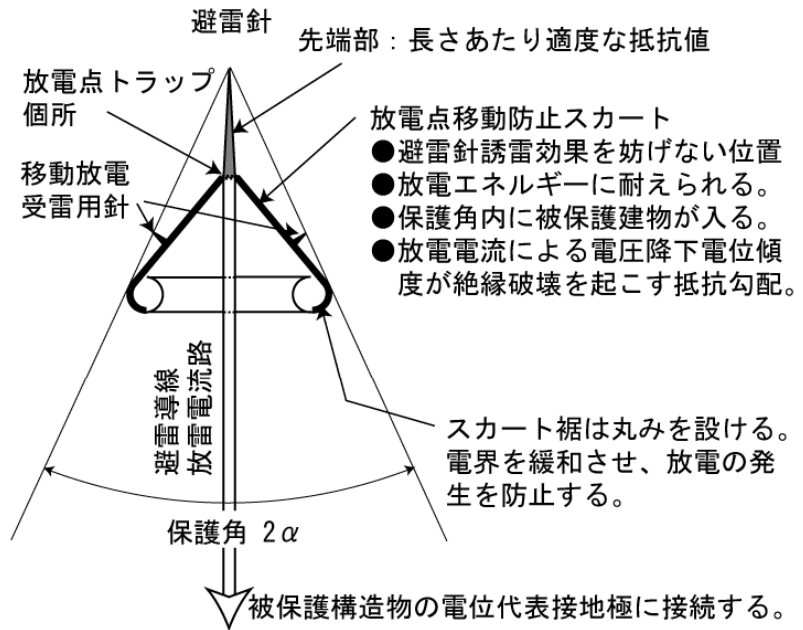
接地インピーダンスが大きい場合、避雷針の電位上昇は落雷電流と接地インピーダンスの積になる。もしこの電位による電界が空気中の耐電圧（例えば 1 気圧の場合 30kV/cm）を越える場合、放電点が被保護建物側に跳ぶ可能性がある。もし、放電点だけで移動が決定されるならば、このような不安定な放電点を避雷針にトラップさせる方法がある。図 3 (a)の構成にすることで放電点をトラップし、放電点が避雷針から逃げることを防止できる。例えば、もし放電点が移動した場合、トラップ部分の径方向に適度な抵抗値を確保することで放電点から流れる電流によって生じる電圧降下を使って空気の耐電圧を越える電界を作り出すことで避雷針軸方向に戻り安定な位置にトラップさせることが可能になる。

例えば、30kA の放電電流で、径方向に 30kV/cm の電界を作るには径方向に $1\Omega/cm$ の抵抗勾配を作る必要がある。雷電流に耐えられるものでこの値を作る方法として、図 3 (b)のように抵抗を螺旋状にすることで確保しやすいものにできる。螺旋状にすることで断面積、また放熱面積も大きくでき、その結果、電流容量も大きくできる。放電点では熱、電離等によりさらに絶縁破壊電圧は小さくなり、小さな電界で移動できるものになると考えられる。

この原理を使用することで放電点を一定の場所にトラップすることが可能になる。

スカートの縁部分は放電点の電位になる。従って、縁に角があると高電界が生じ放電が発生する可能性がある。十分な丸みを持たせ放電の発生が無いようにする必要がある。

一方、避雷針に抵抗を持たせることによる誘導電荷移動時電流による電圧降下は避雷針の誘雷効果を減じる方向

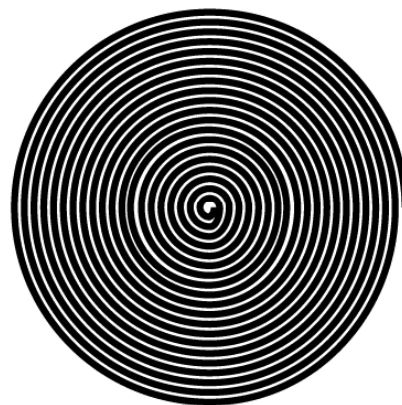


(a) 放電点移動防止避雷針断面図

放電点がスカートに移動した場合、放電点が中央に移動するように作用する。

接地抵抗に大電流が流れることにより避雷針電位が上昇し放電点が周囲の低電位の個所に移動しやすくなるが、被保護部がこのスカートに隠れるようにすることで、防止する。

接地抵抗が大きくなる避雷針に効果を発揮する。



(b) 放電点移動防止スカートの径方向に抵抗勾配を設ける方法
適切な抵抗勾配が螺旋状にして確保することで実現しやすくなる。放電点移動電界生成用抵抗にも適用できる。

図 3 高インピーダンス接地用放電点移動防止避雷針

で作用するが、ステップリーダの進展時間を考えると、避雷針の誘雷を減じる効果は小さいと考えている。

(2) 高抵抗地域の避雷原理

山岳地帯など岩盤地域では接地抵抗は大きく放電点が移動し、岩盤上を移動する。このような場所に被保護機器等がある場合、岩盤上を移動する落雷被害を受けやすくなる。これを防止する方法は、図4に示すように周囲にガード電極を配置することで可能である。岩盤上を移動する雷をガード電極が受けることで侵入を防止することができる。

また円状ガード電極をある一定の高さにし、避雷針を設けることで高さ方向の保護範囲を大きくし、高さのある被保護機器の保護を可能にする。球体法を適用するならば、被保護部分はガード電極と避雷針とが作る雷保護回転球体に接触しない部分が保護範囲になる。球体半径は保護レベルによって異なり、例えば安全率の高い保護レベルIの球体半径は20mになる。例えば、富士山のような、接地抵抗が得にくい岩盤、山頂が帯電雲に囲まれるなど横方向からの落雷が考えられる場所に効果的な方法と考えられる。

3.2 高層ビルへの対策

(1) 避雷導線での電位上昇抑制

避雷針・避雷導線の電位は避雷電流と避雷導線の特性インピーダンスの積になる。この電位が大きいと放電が他に移動する可能性がある。従って、避雷導線の特性インピーダンスはできるだけ小さくすることが必要である。雷電流は内導体流れ同時にその逆極性の誘導電荷が同時に外導体流れることになる。同軸形状で実現する場合、特性インピーダンスを小さくするためには筒と芯間の耐電圧を下げずに静電容量を大きく、内導体のインダクタンスを小さくとることが必要であるが、これを実現するためには同軸外形は大きくなる。例えば、特性インピーダンス

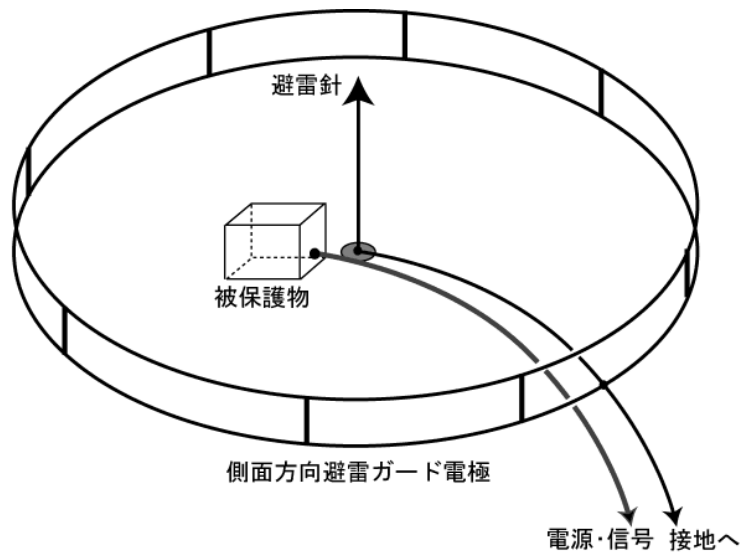
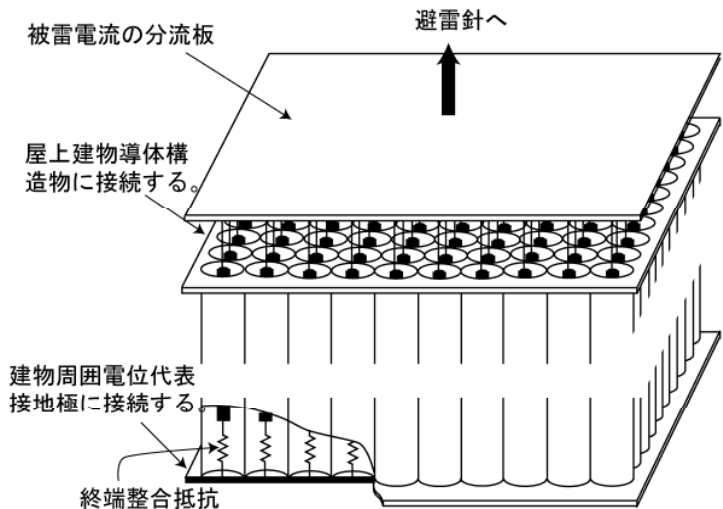
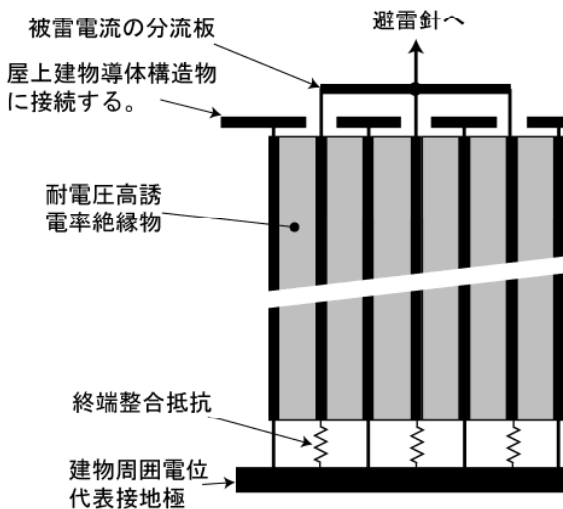


図4 ガード電極による避雷効果

- 避雷針を設けることで上方向からの雷の避雷用である。
- 避雷針とガード電極により斜めからの落雷も防止できる。
- ガード電極形状は被保護物に合わせて決める。
- 落雷被保護物の電源・信号ケーブルも被雷時対策を行う。



(a) 小さい特性インピーダンス同軸線を束ねて並列使用しさらに小さな特性インピーダンスを得る避雷導線の構成



(b) 積層板構成によって低特性インピーダンスを得る避雷導線の構成

図5 低特性インピーダンス避雷(引下)導線の構成

を 0.1Ω 、内外導体間ギャップを 10mm で実現しようとした場合、同軸外形は約 6m になる。現実的なものにするため、耐電圧があり誘電率が大きな絶縁物を使用しできるだけ特性インピーダンスを小さくした同軸ケーブルを多数用意し、それを図 5 (a) のように束ねる、あるいは側壁に多数並べることでコンパクトに実現できる。あるいは図 5 (b) に示すサンドウィッチ構造にする適用方法もある。この場合、同軸芯線は十分な電流容量を確保し、それぞれには均一に電流配分を可能にする仕組みが必要である。

この構成方法は、誘導電流が同軸ケーブル外皮に流れるので、被雷電流が作る磁束を相殺するため、建物への電磁誘導の影響も小さくなる。

(2) 建物の等電位確保

建物の基礎部周囲を低抵抗値導体で取り巻くことで建物の等電位性を高めることができる。この電極は、構造体が低インピーダンス接地であること、さらに低い接地極を周囲に付加することで、低インピーダンスの建物代表接地極とすることができ、地中の配管等建物引込・引出導体からの電位侵入を防止する役割も果たすことが可能になる。

被雷電流を流す避雷導線の終端は、この建物電位を代表する接地極にインピーダンス整合を図り接続することになる。

4 誘導電荷の移動を制御する方法

落雷対策の基本は、被保護部の表面の電界は小さくし、一方、避雷針等の誘雷させる部分は電界を大きくすることである。誘導電荷が被保護機器周辺の電界を決めることになり落雷位置に与える影響は大きいと考えられる。このため、被保護機器は、表面誘導電荷を少なくし、一部に集中させないようにすることが必要である。一方、避雷針等の誘雷部分は誘導電荷を多くし、電界を集中させることが必要である。

雷放電の先端、ステップリーダが放電路を決め、到達点が放電点になる。ステップリーダ先端の電荷量、並びに避雷針あるいは被保護部との距離がそれぞれの電界を決め、ステップリーダの進展速度による距離の時間変化が避雷針や被保護部の誘導電荷を補給する電荷移動速度を決める支配的因子になる。ステップリーダが雲から始まり地表放電点に到達するまでの時間は約 20ms である。従ってステップリーダ先端の移動による誘導電荷の変化は、距離が近くなることで増加し、電界は大きくなる。ステップリーダから保護距離の範囲内の電界が放電位置を決める可能性は大きくなる。

誘導電荷の制御は、基本的には被保護機器部を絶縁させ大気への放散により誘導電荷を低減させることとインダクタンスによる速い電荷移動を抑制することになる。両者を併用することで大きな避雷効果が得られると考えている。

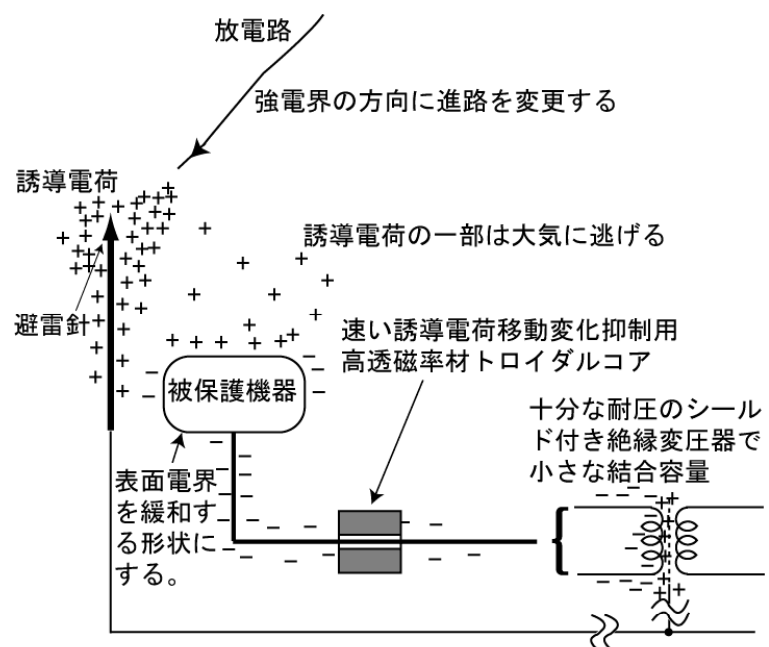


図 6 誘導電荷制御による避雷方法

避雷針やガード電極等の誘雷部分は高電界で大きな誘導電荷が集中させる形状にする。

被保護部は高電界が生ぜず誘導電荷が小さく集中させない形状にする。

速い変化に対してはインダクタンスで電荷移動を抑制する。遅い変化に対しては絶縁変圧器、および光ケーブルで絶縁し誘導電荷を抑制する。

落雷放電先端が近づくことによって誘導電荷が誘導されるが、電荷移動を抑制することで被保護部の誘導電荷を小さくでき、従って電界を小さくできる。一方、誘雷を目的とする避雷針は、誘導電荷を集中させ電界を大きくできる。両者を組み合わせることで避雷効果を高めることができる。平板で絶縁体で覆われた広面積の太陽光発電パネルには効果的な方法と考えられる。

被保護部への避雷対策は、誘導電荷を小さくすることで、次の三つの方法になる。①被保護部の表面電界を小さくする。ステップトリーダに面する部分は平面にし、角は丸くする。②被保護部を絶縁し、誘導電荷を小さくする。③ケーブル途中に同相インダクタンスを加えることで誘導電荷の移動を抑制する。

一方、誘雷部分への対策は、逆に誘導電荷を大きくすることで、次の二つの方法になる。①先端は針状にして、ステップトリーダ方向に向けることで、誘導電荷を大きくする。②避雷導線および接地極のインピーダンスは小さくする。

5 まとめ

以上をまとめると以下のようなになる。

放電点は絶縁破壊電圧を超えると移動することになる。この対策として以下の方法を提案した。

- (1) 避雷針が高電位になっても放電点を移動し難くするトラップ機構を提案した。
- (2) 被保護範囲に移動する放電点が侵入しないようにするガード電極を提案した。
- (3) 落雷電流が流れる避雷導線の電位上昇を防止するため特性インピーダンスを小さくできる方法を明らかにし、また建物電位代表接地極に終端接続する方法を提案した。
- (4) 誘導電荷の移動を制御することで避雷効果を高める方法を提案した。

参考文献

- [1] 北川信一郎、河崎善一郎、三浦和彦、道本光一郎(1996)大気電気学、東海大学出版
- [2] 石井勝 監修、音羽電機工業（株）創業 60 周年記念出版委員会: よくわかる雷対策の基本と技術、日刊建設通信新聞社(2006).