

模擬構造体(平面, 立体)の雷インパルスコロナ特性

武田 学 上野 秀樹 中山 博史

谷口 和彦* 森田 祐志*

電気系工学専攻

Lightning Impulse corona characteristics on modeled framework of building (flat, cube)

Manabu Takeda, Hideki Ueno, Hiroshi Nakayama, Kazuhiko Taniguchi* and Hiroshi Morita*

Department of Electrical Engineering and Computer Sciences

Abstract

When a thunderbolt strikes a building, its huge current makes the building be exposed to a very high voltage. As a simulation experiment, we have performed a corona investigation of ungrounded model frameworks applied lightning impulse voltage, where the discharge images at the frames were observed with an image-intensifying camera. In a plane modeled framework of building, according to an increase in an applied voltage, the corona was generated from the part where concentrated the electric field to out side. On the other hand, the corona to the inside was controlled. The corona to the outside has expanded radially from the framework. As for this characteristic, this characteristic was obtained by the cubic modeled framework. The corona onset voltage of the cubic modeled framework is low, and that of the mesh type is high.

Keywords : lightning impulse, ground potential, corona

1.はじめに

近年,雷による被害が増加する傾向にある。これは建物内に導入されている機器の精密化による耐電圧の低下や,送電線や電力線,ネットワークケーブルを通して雷電流が容易に進入することが原因である。建造物の雷による被害は雷電流による過電流が電気機器に進入すること,雷放電によるインパルス性のノイズなどが挙げられる⁽¹⁾。現代社会において情報は1つの財産となっている。これが雷によって妨害あるいは障害を受けると多大な損害を受ける。このことから雷被害から電力設備や通信設備などの機器を保護することが重要となる。雷被害に対してわが国では様々な接地法を採用し,それにともない様々な接地に関する研究が盛んに行われてきた⁽²⁻⁷⁾。接地極として,以前は棒状電極やメッシュ電極を用いる人工接地極が採用されてきた。しかし,現在では経済性などの点から鉄骨や鉄筋を利用する構造体接地が主流である⁽⁸⁾。また,落雷時に建物内部の通信機器,電力機器などの様々な機器を保護するために等電位ボンディングなどが用いられる。

等電位ボンディングとは個々に接地していたものを統合接地行うことによって建物内部の電位差を低減させることができる。ボンディングには大別して,低圧電路設備,情報・通信設備,および雷保護設備がある。雷保護設備においては雷保護等電位ボンディングがある。これは過電圧保護に密接に関係しているもので,建築物の外部から引き込まれる導電性部材,建築物の構成部材である鉄骨・鉄筋,建築物内部の導電性部材をすべてボンディングすることで建築物内部の等電位化を図るものである⁽⁹⁻¹¹⁾。しかし,建物内部をすべて等電位化することで欠点があると考えられる。現在,測定されている雷電流は数十kA~数百kAといわれている⁽¹²⁾。接地抵抗が数 Ω であったとしても建物全体の電位が数百kV~数千kVに上昇する。いくら建物内部を等電位の状態にしたとしても,電位が上昇することでなんらかの放電現象が建物に起こると考えられ,雷電流によって建造物に生じた電位上昇が起こす危険性などまだ未解明な部分が多い⁽¹³⁻¹⁶⁾。

そこで本実験では鉄骨を模擬した模擬構造体を用い,雷電流が進入し,接地電位が上昇した場合のコロナ特性を調べる目的で構造体に雷インパルス印加した場合の放電の様子を観測した。

2.実験方法

本実験ではビル鉄骨を銅線で模擬し,複数の模擬構造体に雷インパルス印加した場合のコロナ特性を解析した。このことから本実験で用いた模擬構造体は平面模擬構造体と立体模擬構造体を使用した。Fig.1に平面模擬構造体の基本モデルの構成図を示す。Fig.2に立体模擬構造体の基本モデルの構成図を示す。平面の模擬構造体は1辺100mmの正方形で構成した。模擬

* (株)きんでん 京都研究所

構造体は直径 1.6mm の銅線を用いた。また、コロナを平面的に観察するために銅線の背後にアクリル樹脂を取り付け、固定用アクリル樹脂で挟み込むようにして固定した。背後のアクリル樹脂は、縦 300mm 横 300mm 厚さ 5mm を使い、表面抵抗率 $> 10^{16}\Omega$ 、体積抵抗率 $> 10^{15}\Omega \cdot \text{cm}$ 、絶縁抵抗 $> 10^{15}\Omega$ 、比誘電率 3.1 である。平面模擬構造体を接続しているアクリル樹脂は固定用がいしで固定し、平面模擬構造体を高さ 300mm に固定している。立体模擬構造体は図のようなアクリル樹脂でアースから高さ 300mm に固定した。

Fig.2 に本実験の実験回路図を示す。衝撃電圧発生装置に模擬構造体(平面, 立体)を接続した。アースから 300mm に固定し、アースしていない理由は、模擬構造体とアース間で破壊に至らない範囲で実験を行うためである。模擬構造体に印加した雷インパルス電圧は負極性で波頭長 1 μs 、波尾長 42 μs の電圧波を用いた。この電圧の発生には、10 段のマルクス回路からなる日新電機(株)製の衝撃電圧発生器を用いた。平面、立体ともコロナの発生する条件のもとイメージインテンシファイア (XX1500, Philips Ltd.) を取り付けカメラで放電の様子を観察した。

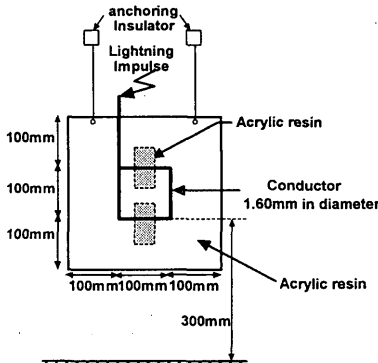


Fig.1 Flat model

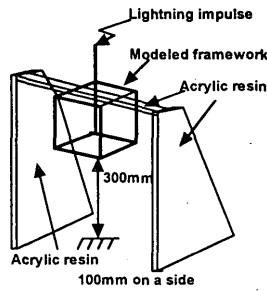


Fig.2 Cubic model

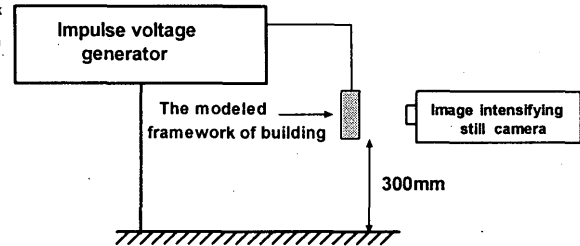


Fig.3 Circuit diagram

3. 実験結果

<3.1> 平面模擬構造体のコロナ挙動

(1) 基本モデルの場合

Fig.4 に平面模擬構造体の構成図と放電の様子を示す。平面模擬構造体の基本モデルは 1 辺 100mm の銅線で構成し、雷インパルスを印加する銅線を D 点に接続した。また、平面模擬構造体はアースから高さ 300mm の位置に固定した。模擬構造体の角を A~D 図中の記号で示す。実験条件は相対湿度 63%、気温 24 $^{\circ}\text{C}$ 、気圧 1atm である。

印加電圧の増加とともに角 A, B, C 点からコロナが進展していることがわかった。印加電圧 68.0kV では角 A, B 点から発光が現れ、印加電圧 74.8kV では角 C 点からコロナによる発光が少し現れた。また、81.6kV 以上の電圧では印加電圧の増加に伴い角 A, B, C からコロナが大きく進展し、88.4kV 以上の電圧になるとアースに近い辺 AB ではコロナによる発光が現れた。しかし、雷インパルスを印加した D 点とその周辺においてコロナによる発光は現れなかった。コロナの進展特性は構造体内部では抑制され、構造体から放射状に進展していることがわかった。

次に、基本モデルの点 A, B, C におけるコロナの伸びの印加電圧依存性を Fig.5 に示す。ここでのコロナの伸びは A, B, C 点とコロナの最も伸びた点との距離を示す。すべての条件において印加電圧の増加に伴いコロナが進展していることがわかる。C 点はアースから離れているために電界が弱く、点 A, B に比べコロナ開始電圧が高いと考えられる。C 点のコロナの伸びが A, B 点に比べても短いのも同じ理由と考えられる。

(2) 雷インパルス印加位置を変化させた平面模擬構造体の場合

雷インパルス印加で発光が見られなかった D 点に着目し、雷インパルスの接続点の位置を変化させた場合の放電の様子を観察した。Fig.6 に放電の様子を示す。Fig.6(a)に雷インパルス印加位置を変化させた場合のコロナの伸び L、傾き ϕ の定義図を示す。Fig.6(b)に模擬構造体の構成図を示す。Fig.6(a)の定義図に

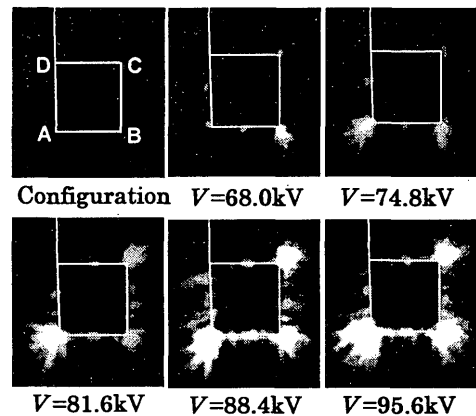


Fig.4 Discharge images (basic model)

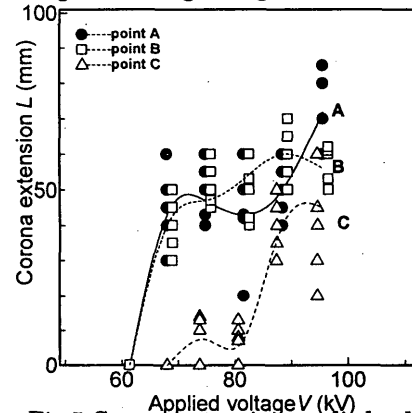


Fig.5 Corona extension L (mm) characteristics (basic model)

示すように辺 CD の延長線 DG とコロナとなす角度をコロナの傾き ϕ とし、D 点とコロナの最も伸びた点との距離 L をコロナの伸びとする。また、図中にはコロナの伸びを直径とする円を描いた。実験条件は相対湿度 52%、気温 19°C、気圧 1atm である。Fig.7 上段に雷インパルスの印加位置 X を一定にした条件で印加電圧を増加させた場合の放電の様子を示す。印加電圧を増加させると、コロナは進展しコロナの傾きは小さくなった。これはコロナの進展方向が接地側に伸びるため角度が小さくなると考えられる。下段は印加電圧一定条件で雷インパルスの印加位置 X を変化させた場合の放電の様子を示している。位置を変化させるとコロナは X =25, 37.5mm で大きくなり、50mm で小さい。角度は X =25, 37.5mm で小さく、37.5, 50mm で大きくなるという結果が得られた。Fig.8 にコロナの傾きのコロナの伸び依存性を示す。Fig.8 から、コロナの伸びが大きくなるとコロナの傾きは小さくなるのがわかる。また、X =50mm ではコロナの伸びは小さく X =37.5mm, X =25mm でコロナが進展し傾きが小さくなるのがわかる。このコロナの伸びが傾きに相関があることは明らかであり、コロナが伸びやすい条件である X =37.5mm, 25mm でコロナの傾きが小さくなっている。

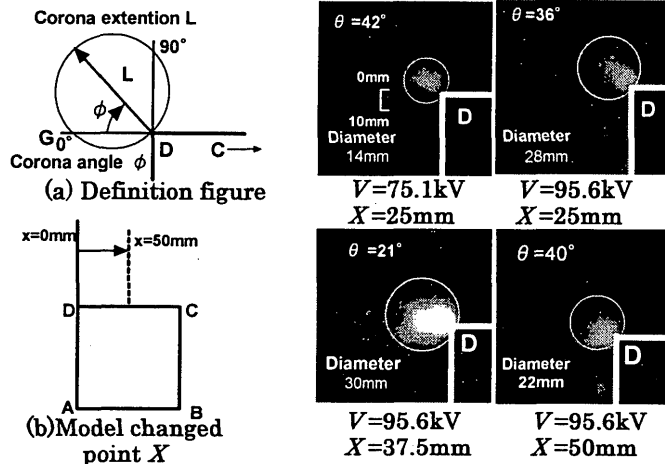


Fig.6 Model changed point X

Fig.7 Discharge images

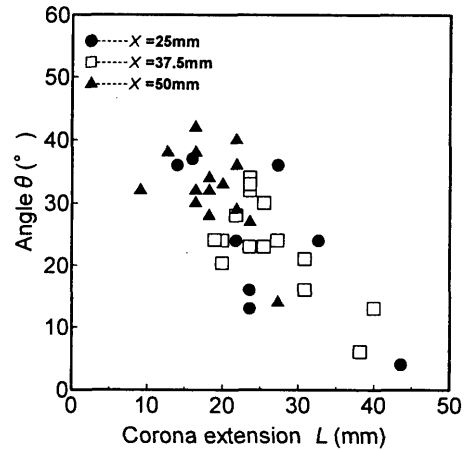
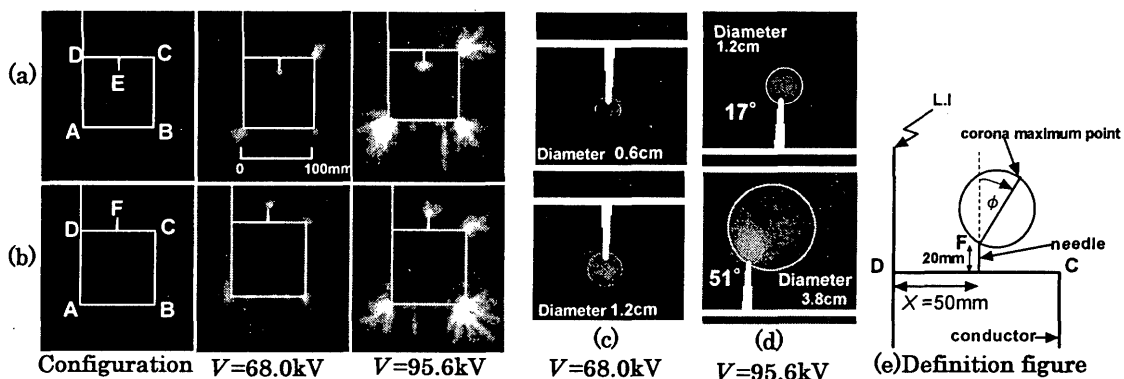


Fig.8 Angle - corona extension characteristics (Model changed point X)

(3)内部,外部欠陥を付加した平面模擬構造体の場合

年月を経た構造体の内部、外部には建築物の補強や鉄骨の劣化などによる様々な欠陥が存在する。そこでこの欠陥を先端局率半径の小さい針で模擬し、その針を構造体内向け、外向けに接続した場合の放電の様子を観察した。Fig.9 に欠陥を付加した模擬構造体の構成図を示す。欠陥には先端局率半径 15 μ m、長さ 20mm の針を用いた。針を D 点と C 点のちょうど中間の位置に接続した。内向き,外向きの針をそれぞれ E,F と呼ぶことにする。この模擬構造体に雷インパルスを印加し、針先でのコロナの様子を観察した。実験条件は相対湿度 46% 気温 19°C 気圧 1atm である。

Fig.9 に内向き,外向き針を用いた模擬構造体の放電の様子を示す。(a)に構造体内向きに針を接続した場合の放電の様子,(b)に構造体外向きに針を接続した場合の放電の様子を示す。(c),(d)に拡大図を示す。(e)に模擬構造体の針先からのコロナの傾きの定義図を示す。ここで針先の延長線とコロナの最も伸びた点との傾きを Φ とした。また、コロナの伸びは針先端からコロナの最も伸びた点との長さをコロナの伸びとした。放電の様子は V =68.0kV,95.6kV の電圧をそれぞれ印加した。内向きに針を接続した模擬構造体では、印加電圧を増加させても針先付近からのコロナは進展せず抑制されていることがわかった。しかし、



(a)Defect model (inside) (b) Defect model (outside)
(c)Magnified figure (inside) (d) Magnified figure (outside)

Fig.9 Discharge images (defect model)

外向きに針を接続した模擬構造体では印加電圧の増加とともにコロナは進展していることがわかった。それぞれの拡大図を見ると、外向きに比べ内向きのコロナが抑制されていることがわかった。また針先付近からのコロナがC点方向に傾いて進展している。印加電圧を増加させるとその傾きは大きくなることがわかった。

Fig.10 に内向き,外向き針からのコロナの伸びの印加電圧依存性を示す。また, Fig.11 に外向き針からのコロナの傾き ϕ の印加電圧依存性を示す。それぞれの測定回数は5回である。Fig.10 から内部へのコロナの進展は抑制され外部へのコロナは大きく進展することがわかった。特に変化が現れるのは $V=81.6\text{kV}$ 以上で内部でのコロナは抑制され, 外部へのコロナは進展する特性が得られた。例えば, $V=88.4\text{kV}$ では内向き針からのコロナに比べ外向き針からのコロナは 22.2mm 大きく進展している。またコロナの傾きにおいては印加電圧の増加とともにコロナは傾く。これは雷インパルス印加している導線の影響でC点方向にコロナが進展していると考えられる。

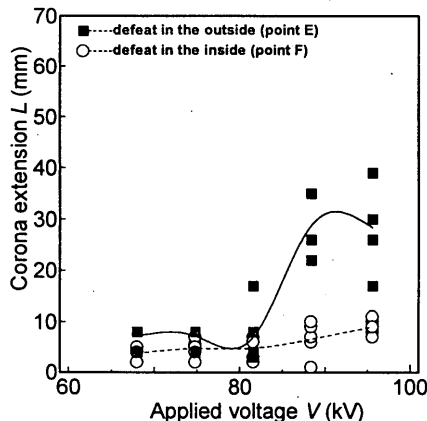


Fig.10 Corona extension - applied voltage characteristics (point E,F)

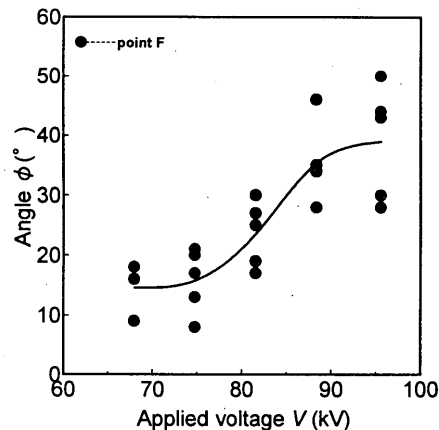


Fig.11 Angle - applied voltage characteristics (point F)

<3.2> 立体模擬構造体のコロナ挙動

(1) 基本モデルの場合

実際には構造体は3D構造をしているために3D構造の模擬構造体に印加電圧を印加し,放電の様子を観察した。

Fig.3の構成図のようにアクリル樹脂で3D構造の模擬構造体を高さ300mmの高さに固定した。基本模擬構造体のすべての辺は1辺100mmの立方体で構成した。また,銅線の直径は1.6mmである。雷インパルス印加する位置をD点に接続した。実験条件は相対湿度43%,気温27°C,気圧1atmである。

放電の様子をFig.12に示す。同図左上の構成図にそれぞれの角の記号を示し,雷インパルス印加する銅線をD点に接続した。印加電圧68.0kVでは地面に近い点A,B,E,Fでコロナが発生した。底面の辺からもわずかにコロナによる発光が現れた。上面の角である角C,H点からもコロナによる発光が現れた。81.9kVになると上面の角であるC,G,Hから発光が現れた。さらに電圧を増加させた印加電圧95.6kVでは,新たに縦の辺と上面の辺CGHにコロナによる発光が現れた。しかし雷インパルス印加したD点とその周辺の辺でコロナが抑制されていることがわかった。またコロナの進展特性としては模擬構造体から放射状にコロナが進展し,内部へのコロナは抑制された。このことから平面模擬構造体の基本モデルにおける特性が立体の模擬構造体の特性に類似していることがわかった。

(2) メッシュ型模擬構造体の場合

次に建築物の構造にさらに近づくために模擬構造体内部に鉄骨を模擬した銅線の数を増やし,それをメッシュ状に構成した模擬構造体のコロナ特性を観察した。実験条件は相対湿度44%,気温26°C,気圧1atmである。

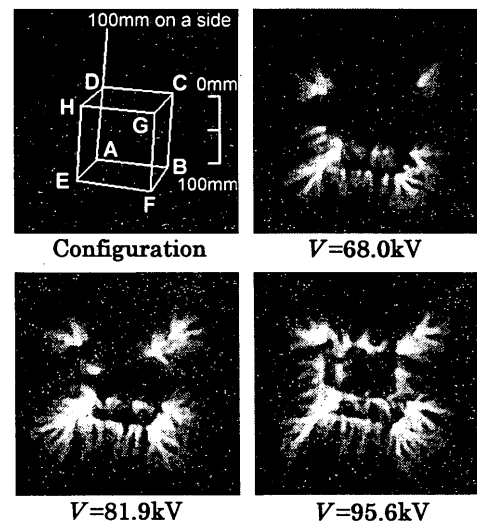


Fig.12 Discharge images (cubic model)

基本模擬構造体同様、雷インパルスを印加する銅線を D 点に接続した。また、メッシュ型の模擬構造体の構成は 1 辺 100mm の立方体にメッシュ状の銅線を 50mm 間隔で接続した。銅線の直径は 1.6mm である。Fig.13 にメッシュ模擬構造体の構成図と放電の様子を示す。

印加電圧 68.0kV では地面に近い角 B 点よりコロナが発生した。81.9kV では底面のすべての角でコロナが発生した。さらに電圧を増加させた 95.6kV では上面の角 CGH 点で新たにコロナが発生した。しかし、雷インパルス印加した D 点とその周辺の辺でコロナによる発光は現れなかった。また、銅線がクロスした点、銅線が接続された点でコロナは抑制された。発光箇所は D 点以外のすべての角とその周辺となった。内部でのコロナは見られなかった。基本模擬構造体とメッシュ型模擬構造体のコロナ開始電圧を比較すると、基本模擬構造体では $V=61.4\text{kV}$ 、メッシュ型模擬構造体では $V=68.0\text{kV}$ であり、メッシュ型模擬構造体でコロナ開始電圧が上昇したことがわかった。また、基本模擬構造体とメッシュ型模擬構造体ではコロナの進展に差が見られた。基本模擬構造体ではコロナ開始電圧が低く、印加電圧の増加に伴いコロナが進展していることわかった。メッシュ型模擬構造体ではコロナ開始電圧は高く、過電圧が加わるとコロナは大きく進展した。

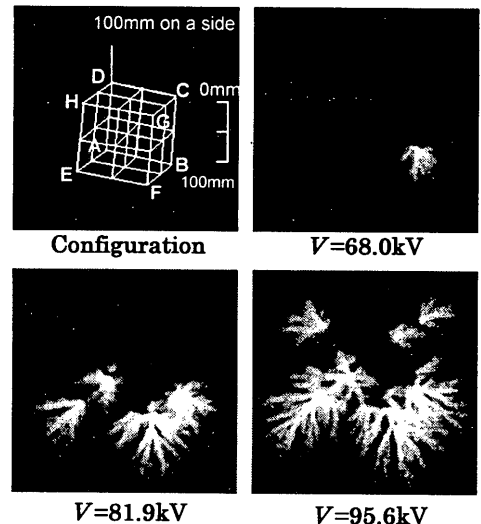


Fig.13 Discharge images (mesh-cubic model)

4.検討

以上の平面模擬構造体、立体模擬構造体の放電の様子から内部へのコロナが抑制される原因について考える。

平面模擬構造体の内向きと外向き針の放電特性に大きく違いがあった。平面模擬構造体の内部では対面する模擬銅線による電界緩和により内部のコロナが抑制されることが考えられる。この影響は外向きに針を接続した際に針先端付近から発生したコロナが雷インパルス印加する銅線の影響を受け、銅線に反する方向に傾いた(Fig.9(d), Fig.11)ことからわかった。また、内向き、外向きに針を接続した場合と比較すると、針先がアースに近い内向き針からのコロナが針先端付近で留まりアースから遠い外向き針からのコロナが大きく進展した。このことから模擬構造体内部は銅線間の電界緩和の影響が大きくコロナが伸びにくい状態であると考えられる。このため内部でのコロナは抑制され、外部へ放射状にコロナが進展するものと考えられる。

次に雷インパルス印加する位置でコロナが抑制される原因について考える。

雷インパルス印加している位置でコロナが抑制されることに関しても同様に雷インパルス印加する銅線と上面の辺 DC 間で電界緩和が起こっていると考えられる。また、雷インパルス印加する銅線を D 点に接続した場合には D 点に電界が集中しないためコロナは発生しない。しかし、雷インパルス印加する位置を変化させることによって、D 点におけるコロナの伸びに変化が見られた。 $X=37.5\text{mm}$ で最も伸び $X=50\text{mm}$ であまり伸びなかったことに関しては明らかになっていない。しかし、Fig.8 の特性からコロナが大きく進展すると傾きが低下することがわかる。これは発生したコロナが地面方向に進展していることを意味する。また、雷インパルス印加される位置がコロナ発生地点から近ければ電界が緩和され、コロナが発生しない確率が増える。D 点でコロナが一度発生する場合、雷インパルス印加した銅線の影響で傾いたコロナが発生するものと考えられる。このことから $X=25\text{mm}$ では D 点でのコロナの発生確率は減少するが、発生したコロナは傾きをもち進展していると考えられる。Fig.8 にもその特性が現れている。雷インパルス印加する位置が遠い $X=50\text{mm}$ では D 点でコロナの発生する確率は高く、雷インパルス印加する銅線の影響が小さく傾きが大きくなると考えられる。 $X=50\text{mm}$ の条件では D 点と雷インパルス印加する銅線との間の距離が大きいため、雷インパルス印加する銅線の影響を受けず、D 点からのコロナ開始電圧が低い。 $X=50\text{mm}$ のコロナ開始電圧は 68kV である。コロナ開始電圧が低いために D 点付近に低い電圧から電離空間を形成し、電離によって生じた空間電荷の影響を受ける。この空間電荷の影響で D 点に電界緩和が起こり、コロナが小さくなると考えられる^(16, 17)。また、コロナの伸びが小さいためにその傾きが大きくなることをわかる。

次に立体の模擬構造体の基本モデルとメッシュ型模擬構造体のコロナ特性の違いについて述べる。

実験結果から模擬構造体の基本モデルとメッシュ型模擬構造体とを比べると、メッシュ型の模擬構造体ではコロナ開始電圧は上昇し、コロナが大きく進展する特性が得られた。基本モデルのコロナ開始電圧は低く、低い電圧で底面の角付近に電離空間を形成し、その電離によって生じた空間電荷の影響を受ける。この空間電荷の影響で底面の角に電界緩和が起こり、コロナが進展しにくい状態にあると考えられる^(17,18)。また、メッシュ型にすることでコロナ開始電圧は上昇する。底面の角で電離空間を形成する電圧も上昇するために、コロナ発生時の電圧が上昇し、コロナによる空間電荷の影響を余り受けることなくコロナが進展するものと考えられる。

5.まとめ

平面模擬構造体,立体模擬構造体に雷インパルスを印加した場合のコロナ特性を以下にまとめる.

(1)平面模擬構造体のコロナ特性

基本モデルのコロナ発生箇所は印加電圧の増加に伴い底面の角 A, B, 上面の角 C 点からコロナが発生した. しかし, 雷インパルスを印加した D 点とその周辺においてコロナは抑制された. コロナ進展特性は模擬構造体内向きへのコロナは抑制され, 模擬構造体外向きへ放射状にコロナが進展した. 雷インパルスを印加した銅線の位置を変化させ D 点での変化を観察した結果, 印加電圧を増加させると, D 点で発生したコロナに傾きが現れた. 雷インパルスを印加した位置が D 点に近ければ印加した銅線の影響を受け, コロナの発生確率が低くなる. コロナが発生する場合, 進展しコロナの傾きは小さくなる. 雷インパルスを印加する銅線が D 点から遠ければ印加した銅線の影響を受けず, コロナの伸びは小さく, コロナの傾きは大きくなる. 内向き, 外向き針を接続した模擬構造体に雷インパルスを印加すると, 内向き針先端付近からのコロナは抑制され, 外向き針先端付近からのコロナは進展した.

(2)立体模擬構造体のコロナ特性

基本モデルにおいて低電圧領域のコロナは地面に近い底面の角, 底面の辺で発生した. しかし, 印加電圧の増加に伴い上面の角においてもコロナは発生した. コロナの進展特性は平面の場合と同様に模擬構造体から放射状に進展し内向きへのコロナは抑制された. また雷インパルスを印加する点とその付近からのコロナは抑制された. メッシュ型模擬構造体において低電圧領域のコロナは底面の角, 印加電圧の増加に伴い上面の角で発生した. コロナの進展特性は基本モデルと同様, 模擬構造体から放射状に進展し, 内向きへのコロナの進展は抑制された. 基本モデルで発生していた辺からのコロナは抑制された. また, メッシュ型模擬構造体内部のコロナは見られなかった. メッシュ型模擬構造体は基本モデルに比べてコロナ開始電圧は上昇し, 過電圧が加わると, コロナは大きく進展した.

参考文献

- (1) 岸本 保夫:「雷・ノイズからいかに情報通信機器を守るか」, 電学誌, 120, pp.104-107(2000)
- (2) 高嶋 武, 河村 誠介, 神谷 卓男:「多層大地に埋設されたメッシュ電極の接地抵抗の計算」, 電学論 B, 102, pp.753-759(1982)
- (3) 高嶋 武, 大坪 昭, 石橋 鏡造:「棒状電極の接地インピーダンスの数値計算」, 電学論 B, 103, pp.183-191(1983)
- (4) 高橋 健彦, 川瀬 太郎:「接地電極の形状係数の推定法」, 電学論 B, 103, p.66(1983)
- (5) 大矢 征, 森 武昭, 長野 眞康, 柳沢 健史:「多電極並列接地による接地抵抗の低減化」, 電学論 B, 106, pp.911-918(1986)
- (6) 高橋 健彦, 川瀬 太郎:「多層大地における棒状電極の接地抵抗の解析」, 電学論 B, 108, pp.229-235(1988)
- (7) 三谷 正志, 高橋 健彦:「多層大地に埋設された棒状接地の電位分布・接地抵抗に関する理論的解析」電学論 B, 121, pp.319-326(2001)
- (8) 高橋 健彦:「図解 接地技術入門」, オーム社, pp.93-95(1986)
- (9) 磯川 千秋:「等電位ボンディングと接地」, 電気設備学会誌, 24, pp.474-478(2004)
- (10) 高橋 健彦:「接地システム入門」, オーム社, pp.115-116(2001)
- (11) 高橋 健彦:「雷に起因する建築物の電磁環境」, 静電気学会誌, 27, pp.178-182(2003)
- (12) 石井 勝, 藤居 文行, 杉田 明子「JLDN で観測した雷放電電流分布の月変化」平成 16 年度電気学会電力・エネルギー部門大会, 21-247(2004)
- (13) 武田 学, 塚崎 稔, 上野 秀樹, 中山 博史, 谷口 和彦, 森田 祐志:「構造体接地における雷インパルス特性」平成 15 年度電気関係学会関西支部連合大会, G1-28(2003)
- (14) 武田 学, 塚崎 稔, 上野 秀樹, 中山 博史, 谷口 和彦, 森田 祐志:「模擬構造体における雷インパルス特性」平成 16 年度電気学会全国大会, G1-144(2004)
- (15) 武田 学, 上野 秀樹, 中山 博史, 谷口 和彦, 森田 祐志:「雷インパルス電圧下における模擬構造体のコロナ特性」平成 16 年度電気学会電力・エネルギー部門大会, 21-249(2004)
- (16) 武田 学, 上野 秀樹, 中山 博史, 谷口 和彦, 森田 祐志:「模擬構造体の雷インパルス放電特性」平成 16 年度電気設備学会全国大会, B-11(2004)
- (17) 細川 辰三, 三好 保憲:「空気中負針パルス性コロナから無パルス性コロナへの遷移過程」電学論 A, 96, pp.365-372 (1976)
- (18) 円城 寺博:「大気中負コロナのパルス性より無パルス性への遷移機構の研究」電学誌, 80, pp.463-471(1960)