

## 論 文

## 有刺電極の過渡接地抵抗特性

佐藤正志\*, 斎藤宏\*\*, 加賀昭夫\*, 中嶋明宏\*  
(1993年6月30日受理)

Transient Grounding Resistance Characteristics of Rod-Electrode  
with Needles

Masashi SATO,\* Hiroshi SAITO,\*\* Akio KAGA\*  
and Akihiro NAKAJIMA\*

(Received June 30, 1993)

A grounding design of steel towers is a main factor for transmission lines to take measures against lightning. Especially for restraint of the back flashover by lightning strokes, a transient grounding resistance of steel towers for surge current should be reduced as soon as possible. A rod-electrode with needles has potentialities for the reduction of the transient grounding resistance at narrow sites with many lightning strokes. The reduction mechanism is still not clear, although it may be closely related to the apparent expansion of the electrode surface area by discharge streamers from needles at lightning strokes. Using a single driven rod with needles, therefore, the fundamental studies on the transient grounding resistance characteristics are conducted for different applied voltages and soil resistivity.

### 1. まえがき

送電線の雷害対策として鉄塔の接地設計は重要な要素の一つである。接地抵抗としては、一般には低周波交流電圧を用いた接地抵抗計による定常接地抵抗値が問題とされている。しかし、雷撃時の鉄塔逆フラッシュオーバーを抑制するためには、雷サージを対象とするいわゆる過渡接地抵抗をできるだけ小さくすることが要求される。

定常接地抵抗を低減するため、従来様々な接地工法や接地電極が開発されている<sup>1)</sup>。接地工法としては、棒状電極を土壤の抵抗率の低い所まで深打ちする方法や、接地抵抗低減剤を使用する方法などがあげられる。一方、接地電極としては、棒状電極のほかに、板状や網状の電極があり、また網状と棒状を組み合わせたものなどがあ

る。しかし、網状電極は変電所など比較的接地面積を大きくとれる地点では問題ないが、山岳地の岩盤地帯やあまり敷地が広くない所では、棒状電極を深打ちする方法が一般的に採用されている。

さて、山岳地帯など襲雷頻度の高い地点はとりわけ鉄塔の過渡接地抵抗の低減が要求される場所でもある。このように雷撃が多く、かつ接地面積の狭い地点で有効に過渡接地抵抗の低減効果が得られるものと期待されるのが、刺状突起付き棒状電極（以下、単に有刺電極と呼ぶ）である。これは、雷撃時に刺状突起によってコロナ（土中ストリーマ）の発生時間が早まり、かつその成長が大きいことによって逆フラッシュオーバーの遅れ時間で接地抵抗低減効果が現れるためと考えられている<sup>2)</sup>。

このように有刺電極の過渡接地抵抗低減効果は比較的古くから指摘されているが、その詳細は不明な点が多い。そこで本研究は单一打込棒の接地モデル<sup>1)</sup>により、有刺電極の過渡接地抵抗特性について印加電圧および土壤抵抗率の点から基礎的な検討を行った<sup>3),4)</sup>。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験回路

土壤の抵抗率は粒度、水分量、粗密、温度などの因子によって大きく変化する。本研究では土壤として天然の

**キーワード：**過渡接地抵抗、有刺接地電極、土中ストリーマ、接地設計

\* 秋田大学鉱山学部電気電子工学科 (010 秋田市手形学園町 1-1)

Department of Electrical and Electronic Engineering, Mining College, Akita University, 1-1 Tegata Gakuen-cho, Akita, 010 Japan

\*\* 秋田大学教育学部技術科 (010 秋田市手形学園町 1-1)

Department of Industrial Arts, College of Education, Akita University, 1-1 Tegata Gakuen-cho, Akita, 010 Japan

山砂を用いた。この砂の粒度は単位重量の 79% が 150  $\mu\text{m}$ ~350  $\mu\text{m}$  で、その粒度分布、成分は同一である。また、土壤の温度係数は -0.023~-0.037 と小さく<sup>5)</sup>、実験中の室温の変化の範囲では温度の影響は少ないものとした。

この砂をあらかじめ約 130°C の恒温器内で約 12 時間加熱して水分を蒸発させた後、室温まで冷却した。これに濃度 1% の食塩水を所定量加えて土壤の抵抗率を調整した。大地の抵抗率は場所や季節によって大きく異なるが、大まかに 100  $\Omega \cdot \text{m}$  より低い低抵抗率地帯、1,000  $\Omega \cdot \text{m}$  より高い高抵抗率およびその中間の中抵抗率地帯

に分類されている<sup>6)</sup>。そこで本研究では土壤の抵抗率として 80, 300, 500, 1,000  $\Omega \cdot \text{m}$  の 4 種類を採用した。

図 1 に実験に用いた電極の形状を示す。棒状電極は刺なし、刺付きのいずれも直径 32 mm、長さ 360 mm の鉄円筒であり、有刺電極はこれに直径 2 mm、長さ 37 mm で先端の曲率半径が 200  $\mu\text{m}$  の刺状突起を円筒表面に 90 度の間隔で 4 本付けたものを用いた。また、外部電極は直径 500 mm、高さ 400 mm の鉄円筒を用いた。

図 2 に実験回路の概要を示す。前章で述べたように、本研究は雷電流が接地電極を通じて土壤に流入する際の接地抵抗特性を明らかにすることを目的としている。このため衝撃電流を試料土壤に印加する必要がある。そこで本実験では、図中のコンデンサ C (8  $\mu\text{F}$ ) に充電した電圧を試料土壤に印加する方法を採用した。その結果、次章で詳述するが、印加電圧は充電電圧を波高値とし波頭長が約 2  $\mu\text{s}$  の衝撃電圧となり、試料土壤に衝撃電流が流れた。なお、送電線に現れる雷波形は千差万別<sup>7)</sup> であるが、一般にラッシュオーバ現象の解析には波頭長が 0.75~4  $\mu\text{s}$  程度の衝撃電圧が用いられている<sup>8)</sup>。従って本実験における印加電圧波形はこの条件を満足している。

次に実験方法について述べる。図 2 は X 線用フィルムにより土中ストリーマを撮影する場合について示しているが、通常の測定はフィルムを埋設しないで行った。

初めに、外部電極容器の中心に内部電極を設置した後、土壤を約 300 mm の高さまで充填した。土壤の充填密度は約 1,280  $\text{kg}/\text{cm}^3$  である。

次にスイッチ S2 を開き、スイッチ S1 を閉じてからコンデンサ C に正極性電圧を充電した。充電電圧は 5, 10, 15, 20 kV の 4 通りとした。所定の電圧に充電され

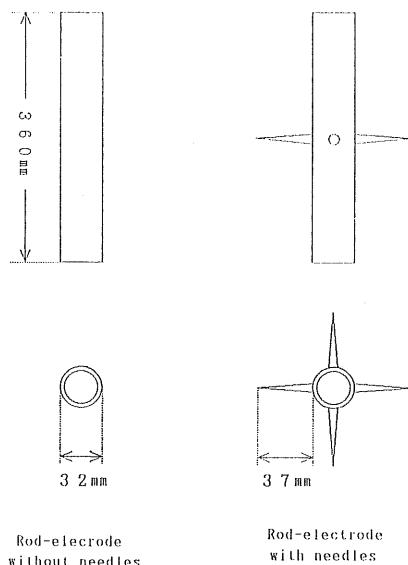
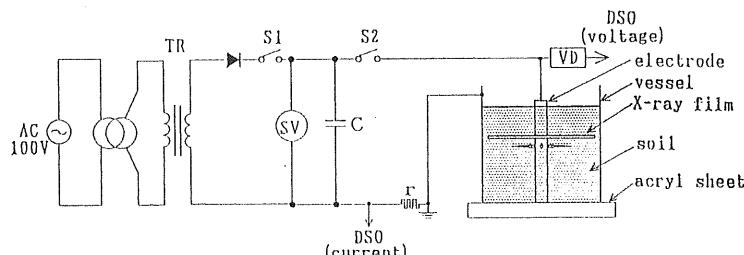


図 1 電極の形状

Fig. 1 Electrodes.



TR : leakage transformer (100/15,000 V)

S1 : knife switch

S2 : oil switch

SV : static voltmeter

C : Capacitor bank (8  $\mu\text{F}$ )

r : non-inductive resistance for current measurement (0.2  $\Omega$ )

VD : voltage divider (2000:1)

DSO : digital storage oscilloscope

図 2 実験回路の概要

Fig. 2 Experimental circuit.

たらスイッチ S1 を開き、スイッチ S2 (高圧油入開閉器、定格短時間電流 4.4 kA) を投入することによって電圧を試料土壤に突印した。印加後の電圧波形は分圧比 2000 : 1 の分圧器 (パルス電子技術 EP50K) を介し、また電流波形は 0.2Ω の無誘導抵抗を介してデジタルオシロスコープ (TEKTRONIX2221) で測定した。この電圧、電流波形を GPIB を用いてパソコンに入力し、抵抗波形を計算した。

なお、一度充填した土壤について同一印加電圧のもとで 3 回測定を行った。その結果、測定値には印加回数の影響がほとんど認められなかったので、3 回の平均値をもって 1 データとした。しかし、接地電極と土壤の「なじみ」を考慮して、同一条件でこのプロセスを 4 回行い、得られた四つのデータをもって検討を行った。

また、本研究においては各条件について土中ストリーマの撮影を行った。その際沿面放電の影響ができるだけ小さくするため、図 2 のように刺状突起の上部に土壤を挟んで X 線用フィルムを設置したが、撮影可能な離隔距離は約 2 mm であった。土中ストリーマを撮影する場合には、電圧の印加は 1 回のみとし、1 回ごとにフィルムを取り替えた。なお、フィルムの有無による特性への影響は認められなかった。

## 2.2 打ち切り誤差

実際の接地抵抗は無限遠方までの抵抗を含む。一方、本実験のような測定を行う場合、外部電極が必要となる。その結果、外部電極から無限遠方までの抵抗を無視する（打ち切る）ことになる。接地電極から離れるほど面積が大きくなるため、接地抵抗は電極近傍で著しく大きい。しかし、大地に電極を埋設した場合とを比較しておく必要がある。そこで、これを評価する方法として、本実験系における抵抗の打ち切り誤差<sup>①</sup>を求めてみる。

いま実際の大地が一様な抵抗率  $\rho$  をもつと仮定し、この土壤に長さ  $l$ 、半径  $r_0$  の棒状電極を埋設したとすると、無限遠方までの抵抗  $R$  は図 3 から、

$$R = (\rho / 2\pi l) \ln \{ (r_0 + l) / r_0 \} \quad (1)$$

となる。一方、本実験の同軸円筒電極の抵抗  $R_0$  は、内部電極の半径を  $r_0$ 、外部電極の半径を  $r_1$  とすると、

$$R_0 = (\rho / 2\pi l) \ln (r_1 / r_0) \quad (2)$$

従って、両式から、

$$R_0 / R = \ln (r_1 / r_0) / \ln \{ (r_0 + l) / r_0 \} \quad (3)$$

(3) 式に本実験系の内部電極の半径  $r_0$  (0.016 m)、外部電極の半径  $r_1$  (0.25 m) および土壤充填高さ  $l$  (0.3 m) を代入すると、 $R_0 / R = 0.922$  となり、打ち切り誤差  $\epsilon$  は、

$$\epsilon = (l - R_0 / R) \times 100 = 7.8 [\%]$$

となる。従って、本実験系は、長さ 0.3 m の棒状電極を

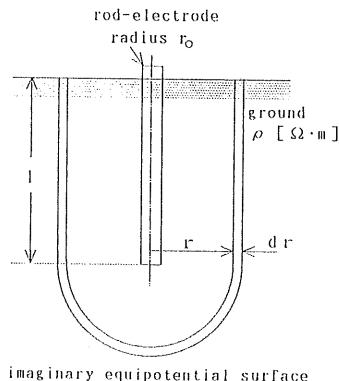


図 3 大地に棒状電極を打ち込んだ状況

Fig. 3 Simplified model of a single driven rod.

埋設した場合の無限遠方までの接地抵抗の 92.2% を含んでいることになる。

## 3. 実験結果および検討

### 3.1 印加電圧および土壤の抵抗率との関係

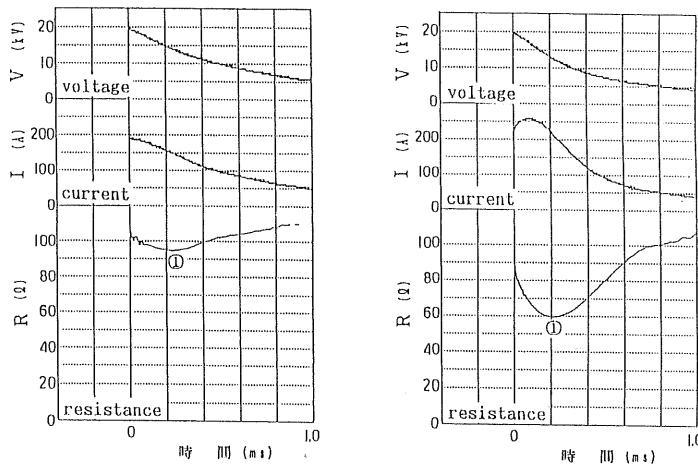
前述のように、大地の抵抗率は場所や季節によって異なっている。例えば大地抵抗率の季節変動に関しては、同一地点でも夏冬の差が約 2 倍になるという報告もある<sup>10</sup>。従って、接地抵抗の特性は雷電圧の大きさのみならず大地抵抗率によっても大きく変化することが予想される。そこで本研究ではこれらを模擬するため、それぞれ土壤の抵抗率と印加電圧を変化させて検討を行った。

図 4 に一例として、抵抗率が 80 Ω·m の土壤に電圧 20 kV を印加した場合の電圧、電流および接地抵抗の時間変化を示す。(a) 図が棒状電極、(b) 図が有刺電極の例である。各図の上段が電圧、中段が電流の変化を表しており、これらから得られた結果が下段の抵抗の変化である。

電圧波形は(a)図、(b)図とも印加後波高値を経て減衰している。この波高値は図 2 のコンデンサの充電電圧に等しい。従って、本論文ではこの波高値をもって印加電圧を表すこととする。また、図 4 の時間スケールでは明らかでないが、電圧波形の立ち上がりは約 2 μs である。

電流波形は、棒状電極の場合には電圧波形とほぼ同期的に変化しているが、有刺電極の場合には電圧印加後一旦増加してから減衰に転ずる傾向を示している。それぞれの波高値を比べると、棒状電極が 190 A に対し有刺電極で 260 A と約 37% 高くなっている。

抵抗波形は、棒状、有刺いずれの電極においても電圧印加後一旦減衰し、最低値（図中①）を経て増加に転ずる波形となっている。しかし、最低値の現れる時間は有刺電極の方が棒状電極に比べてやや早くなっていること



(a) rod-electrode without needles

(b) rod-electrode with needles

図4 電圧、電流および接地抵抗の時間変化  
(土壤の抵抗率 80 Ω・m, 印加電圧 20 kV)

Fig. 4 Voltage, current and ground resistance wave forms.

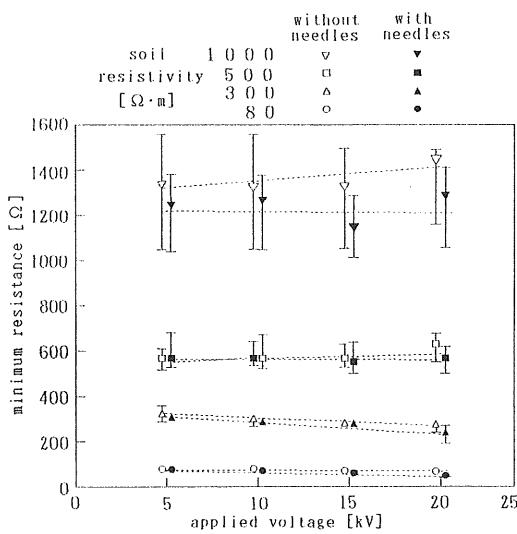


図5 最低抵抗値と印加電圧との関係

Fig. 5 Relation between minimum resistance and applied voltages.

が分かる。また、電圧印加直後の抵抗から最低抵抗への減衰の割合をみてみると、棒状電極では 105Ω から 95Ω と約 10% の低下であるのに対し、有刺電極では 90Ω から 60Ω と約 33% も低下している。以上の点から、この最低抵抗値が両電極の過渡接地抵抗特性を表す重要な因子の一つであると考え、以下に検討を行った。なお、(a) 図、(b) 図ともさらに測定時間を延ばしていくと抵抗値は定常抵抗値に近づいて行くことが確認されている。

図5に、最低抵抗値と印加電圧との関係を示した。こ

れらはいずれも4回の測定結果である。抵抗率が 500 Ω・m, 1,000Ω・m と高い場合には、印加電圧が高くなると棒状電極の最低抵抗値（平均値）（▽, □）は高くなる傾向にあるが、有刺電極（▼, ■）ではやや低下する傾向がみられる。これに対して抵抗率が 300, 800Ω・m と低い場合（△, ▲, ○, ●）には両電極とも印加電圧の上昇に伴って最低抵抗値は低下している。しかし、どの抵抗率においても、程度の差はあるが有刺電極の方が抵抗値は低く現れており、過渡抵抗の低減効果がみられる。抵抗の低減効果に関しては、衝撃大電流に対する抵抗と交流低圧に対するそれとの比をとって表す<sup>11</sup>場合がある。本研究は有刺電極の抵抗低減効果を検討することを目的としているので、刺状突起の有無に関して次のような「最低抵抗比」を定義して考察してみる。

$$\text{最低抵抗比} = \frac{\text{有刺電極における最低抵抗値}}{\text{棒状電極における最低抵抗値}}$$

図6に、図5の最低抵抗値（平均値）から求めた各抵抗率における最低抵抗比と印加電圧との関係を示す。同図において最低抵抗比の値が 1 より小さければ、有刺電極による接地抵抗の低減効果が現れていることになる。

土壤の抵抗率が 300Ω・m (▲) と 500Ω・m (■) における最低抵抗比は、印加電圧が低い場合にはほぼ 1 であるが、印加電圧の増大に伴って低下する傾向にある。1,000Ω・m の場合 (▼) には 0.9 程度となっている。これに対して 80Ω・m の場合 (●) には、印加電圧が 15 kV 以上になると最低抵抗比が著しく低下する傾向がみられる。図5では縦軸スケールの関係上、800Ω・m の場合に棒状電極と有刺電極の最低抵抗値に大きな差が見

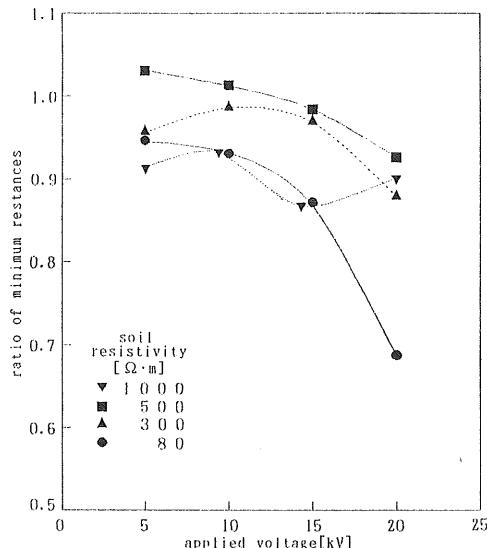


図 6 最低抵抗比と印加電圧との関係

Fig. 6 Relation between the ratio of minimum resistance and applied voltages.

られなかつたが、最低抵抗比を用いることによって過渡抵抗の低減効果を明らかにすることことができた。

### 3.2 土中ストリーマによる検討

前節では、有刺電極による過渡接地抵抗特性について印加電圧と土壤の抵抗率との関係から検討した。その結果、著しく抵抗低減効果が現れる条件があることが分かった。従来、これは高電圧印加によって電極周辺に発生する土中ストリーマの進展に関係があると考えられている<sup>2)</sup>。そこで、本研究においても土中ストリーマの進展状況から前節の結果を考察してみる。

土中ストリーマは電極表面から3次元的に進展していると考えられるが、ここでは図2に示したように刺状突起に水平に埋設したX線用フィルム上の影像としてとらえることとする。このように放電領域に近接してフィルムがあると、刺状突起からの放電がフィルムの沿面を進展し、本来の放電の進展状況と異なってしまう恐れがある。例えば、林<sup>2)</sup>は半球状モデルの中心電極直下に埋設したX線用フィルムを用いて土中ストリーマ像を撮影している。この場合フィルムと電極が接触しており、沿面放電の影響を認めながらも、ストリーマ像の大きさや形状から計算した接地抵抗が実験値と比較的よく一致すると報告している。従って、フィルム上のストリーマ像は沿面放電を多少含む恐れがあるものの、接地電極からの放電の進展状況を比較的よく表しているものと考えられる。本研究においては、刺状突起とフィルム面との間に約2mmとわずかではあるが土壤が存在しており、より

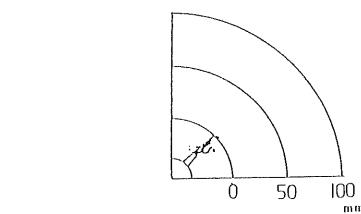


図7 土中ストリーマ像（縮小コピー）  
(土壤の抵抗率 80 Ω·m, 印加電圧 15 kV)

Fig. 7 Streamer figure in soil (reduced figure by copygraph).

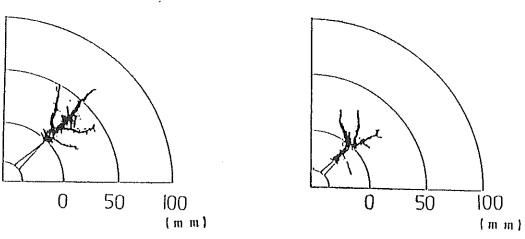
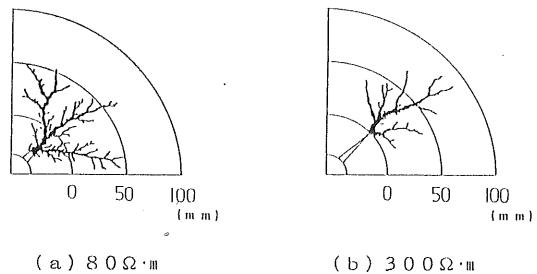


図8 土壤の抵抗率による土中ストリーマ像（縮小コピー）  
(印加電圧 20 kV)

Fig. 8 Streamer figures for different resistivity of soil (reduced figure by copygraph).

沿面放電の影響の少ないストリーマ像が得られるものと期待される。

本研究の実験条件では、いずれの抵抗率の土壤においても10kV以下の印加電圧ではストリーマ像は撮影されなかった。図7に、抵抗率が80Ω·mの土壤に15kVを印加した場合のストリーマ像の一例を示す。これは四つ切りのX線用フィルム(富士ソフテックスJX)を電子複写機で縮小コピーしたものである。刺状突起の近傍にわずかにストリーマが見られる。これは、4本の刺状突起のうちストリーマの進展が大きく現れた1本を示しているが、ストリーマが発生する突起が常に同じではない。また、図中のスケールは突起先端からの距離を表している。

図8(a)～(d)に、各抵抗率の土壤に20kVを印加した場

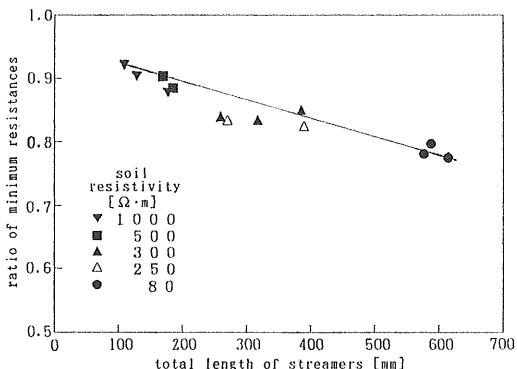


図9 ストリーマの伸びの和と最低抵抗比との関係

Fig. 9 Relation between total length of streamers and the ratio of minimum resistance.

合のストリーマ像の一例を示す。いずれも図7と同様、電子複写機による縮小コピーである。ストリーマの到達距離では(b)図の300Ω·mの場合最も大きいが、抵抗率が低いほどストリーマの枝分かれが大きいことが分かる。とくに80Ω·mの場合に顕著に現れている。さらに、(a)図と図7を比較すると、同一の抵抗率では印加電圧の高い方がストリーマが進展しやすいことが分かる。

林<sup>12)</sup>によると、半球状電極によるストリーマの形状は土壤の抵抗率によって、本実験のような樹枝状になる場合と一様な拡散形になる場合がある。土壤の抵抗率が高いと絶縁耐力が高くなり、局部破壊により絶縁の弱いところをストリーマが進展し樹枝状に進展するものと考えられる。しかし、図8(a)のように80Ω·mという低抵抗率にもかかわらず樹枝状に進展している点は刺状突起の特徴である。これは刺状突起の先端が著しい高電界であるためと考えられる。

さて前述のように、土中ストリーマの発生により接地電極の実効的な表面積が増大するため、過渡接地抵抗が低減するものと考えられる。従来はこの点を評価するためストリーマの伸び、すなわち最大到達距離に注目していた。しかし、実効的な表面積を考えるならばむしろストリーマの広がりが大きく影響を及ぼすことになろう。このため筆者らは図7や図8のストリーマのすべての枝の長さを足しあわせることにより、その進展の評価を試みた。

図9にこのようにして求めたストリーマの伸びの和と、図6で示した最低抵抗比との関係を示す。図には250Ω·mのデータ(△)も加えてある。その結果、最低抵抗比はストリーマの伸びの和が大きいほど小さくなっていることが分かる。

以上のように、土壤の抵抗率が低いほど有刺電極の過渡接地抵抗の低減効果が大きく現れることが示された。

このことは、高抵抗率の土壤でも接地抵抗低減剤を使用し電極周辺の抵抗率を下げるにより、有刺電極によって過渡接地抵抗を著しく低減できる可能性を示唆している。

#### 4. まとめ

刺状突起の付いたいわゆる有刺電極の過渡接地抵抗特性について基礎的な検討を行った。主な結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 有刺電極の過渡接地抵抗は、印加電圧と土壤の抵抗率を変えても突起のない従来型の棒状電極に対して低く現れる。とくに、土壤の抵抗率が低く、印加電圧が高いほど低減効果が大きいことが分かった。
- (2) 有刺電極の棒状電極に対する抵抗低減効果を、最低抵抗比により評価できることが示された。
- (3) 電圧印加によって発生する土中ストリーマの進展を、X線用フィルムで撮影した樹枝状ストリーマの枝の長さの和を求めるこことによって検討した。その結果、ストリーマの伸びの和が大きくなると抵抗低減効果が大きく現れることが分かった。

本研究で得られたようなストリーマ像には、フィルム面での沿面放電の影響も含むものと考えられる。とくに本実験では印加電圧として正極性を用いているため、負極性印加時よりその影響が大きく現れるものと推測される<sup>2)</sup>。今後この極性効果についても検討を行いたい。また、刺状突起の長さ、本数、あるいは接地抵抗低減剤の影響、土壤の季節変動による影響などについても検討が必要であろう。

終わりに、本実験の実行にご協力頂いた秋田大学名誉教授赤上陽出男先生、東北電力(株)八柳紀一氏、光技建工業(株)青木威世男氏ならびに秋田大学鉱山学部大学院修了生の藤原航君(現在、富士石油(株))に深謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 川瀬太郎：地絡保護と接地技術、p. 62、オーム社(1977)
- 2) 林 実明：電気評論、74 (1989) 454
- 3) 藤原 航、佐藤正志、斎藤 宏、加賀昭夫、赤上陽出男：静電気学会論文集'92、p. 417、静電気学会(1992)
- 4) 佐藤正志、斎藤 宏、加賀昭夫、赤上陽出男、藤原 航：電気学会閉鎖保護・高電圧合同研究会資料、SP-92-43/HV-92-109、p. 75 (1992)
- 5) 高橋健彦：図解接地技術入門、p. 56、オーム社 (1986)
- 6) 白井照二：鉄道通信、5 (1989) 38
- 7) 電気学会：高電圧工学(第二次改訂版)、p. 203、オーム社 (1988)
- 8) T. Udo : IEEE Trans. Power Deliv., 8 (1993) 660
- 9) 高橋健彦：図解接地設計入門、p. 135、オーム社(1990)
- 10) 同上、p. 32
- 11) 法貴四郎、三田 昇：絶縁と閃絡防止、p. 223、オーム社 (1951)
- 12) 林 実明：電気学会雑誌、87 (1967) 133