

論 文

カーボンストート捕集用電気集じん装置における 放電極肥大現象

増田 閃一*, 文在徳*

(1982年1月25日受理)

Contamination of Discharge Electrodes in a Precipitator Collecting Carbon Soot

S. MASUDA* and J.D. MOON*

(Received January 25, 1982)

The soot deposition on the corona wires is the most difficult problem in an electrostatic precipitator collecting carbon soot from diesel engines. It is hard to remove even with a strong hammering, and degrades the collection performance. It is observed that the deposition in this particular case of carbon soot occurs primarily by the transfer of the particles reentrained from the fluffy soot layer on the collecting electrode. The deposition takes place on to the local area where corona discharge is weak or does not exist, and it tends to propagate to the neighbouring areas by suppressing corona activity. Hence, the deposition is hard to occur on the positive corona wire or on the very fine negative corona wire with intense corona activity because of the uniformity in distribution of corona discharge along the entire length of the wire. In the case of negative corona wires with ordinary diameter, the deposition can take place on the areas between the corona spots, even when the corona activity is strong. The corona discharge of both negative and positive polarities indicates a counter-effect of removing the carbon soot deposit from the discharge electrode. This self-cleaning effect is due to the chemical oxidation of the soot by active oxygen species or ions, and also to the mechanical vibration of the wire. Hence, the whole deposition process is subjected to the competitive actions of the deposition and self-cleaning effects. Electric heating of corona wire indicates a strong effect of avoiding soot deposition. Its mechanism may be thermal repulsion of soot (thermophoresis), enhanced chemical oxidation and sputtering effects, increased corona activity and its uniformity in distribution, and the enhanced corona vibration of the wires appearing when heated.

1. 序論

ディーゼルエンジンから発生するカーボンストート捕集用電気集じん装置として筆者らは移動ベルト型電気集じん装置(moving-belt type EP; MBEP)を開発した¹⁻⁶⁾。この装置はカーボンストートに固有の難問の大部分を解決し、その捕集性能も満足すべきものであるが、なお未解決の問題として放電極がストートの堆積により肥大する現象がある。すなわち、装置内のガスの流速が遅く(0.5 m/s 以下)、長期間運転した場合、または入口のストート濃度が非常に高い場合には著しい放電極肥大が起こる。この堆積ストートは放電極に強固に付着し、強いハンマリ

ングによっても剥離が困難で、成長に伴ってコロナ放電の発生を妨げ、捕集性能を大幅に低下させる⁴⁻⁶⁾。

放電極肥大の原因については從来グレーディエント力によるものとする説、コロナ電離領域内で正イオンにより荷電されて放電極に吸引されるという説等があるが、今までのところ詳細な実証的研究は行なわれておらず、その正確な機構も明らかにされていない。今回筆者らは MBEP でのカーボンストートによる放電極肥大を解決するためこの現象について研究したので、以下にその結果を報告する。

2. 実験装置

本放電極肥大現象についての研究を行なった実験装置はすでに報告した移動ベルト型電気集じん装置(有効長さ 90 cm, 有効高さ 40 cm, 有効幅 6 cm)である¹⁻⁶⁾。カーボンストートは都市ガスと空気を 1 対 10 の容積比率

* 東京大学工学部電気工学科 (113 東京都文京区本郷 7-3-1)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Tokyo, 3-1, Hongo 7-chome, Bunkyo-ku, Tokyo, 113 Japan

で混合のうえ燃焼させ、生じた長炎を急冷させることにより発生させた。ストークの粒径は $0.06\sim2.0\ \mu\text{m}$ の間に分布し、質量中心径 (mass median diameter) は約 $1.0\ \mu\text{m}$ 、濃度は MBEP 内の流速が $0.25\ \text{m/s}$ の場合集じん室入口で $120\ \text{mg}/\text{Nm}^3$ である^{1,5)}。

3. 放電極肥大現象の観察

3.1 カーボンスートによる肥大の機構

放電極の肥大現象を詳細に観察した結果、まずこの現象が放電極と対向したベルト集じん極上のカーボンスート堆積状況ときわめて大きな相関があることが見いだされた。

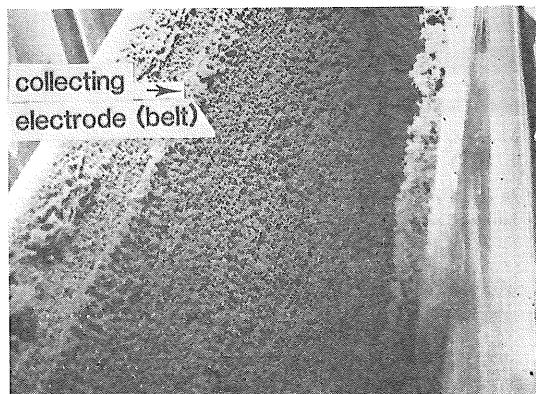
図 1 および図 2 に放電線に負電圧を印加した場合のベルト集じん極上の 120 分後のストークの堆積状態と放電線 (直径 $0.5\ \text{mm}\phi$ 、線間隔 $3\ \text{cm}$) の肥大状況を示す。図 2 (a) はベルトを停止して中央部上下の入口に設けた針状負コロナ放電極により予備荷電されて集じん室内に入ったストークが中央部分で大部分捕集されている場合の放電線の肥大状況であって、中央部の放電線が著しく肥大している。(b) は(a)と同一条件でベルトを駆動した場合で、肥大は中央部から両側に広がっている。(c) はベルトを停止のうえ、上方から連続的に注水してベルト上に水膜 (厚さ約 $1\ \text{mm}$) を形成し捕集されたすべてのストークを再飛散させることなく水とともに流下させた場合であって、放電線肥大はほとんど起きていない。以上の結果から放電線に堆積するストークの大部分は集じん極上に堆積したストークから再飛散してきた粒子であるというきわめて重要な知見に到達した。したがって、放電線肥大防止の一つの条件は集じん極からストークを迅速に除去するか、これを強固に保持することによってその再飛散の発生を防ぐことにあることがわかる。

もちろん、このほかにも従来考えられていたようなグレーディエント力やコロナ領域での正イオンによる荷電等の肥大機構も同時に働いていることが予想される。し

かし、これらは再飛散を生じやすいカーボンスートの場合、二次的な役割を担っているにすぎない。

いずれにせよ、いったん肥大が開始すると、コロナ放電が抑制され集じん極からの飛来粒子を負に荷電して反発する作用が低下するので、肥大は加速度的に進行する傾向を有する。したがって、コロナ放電が活発でかつ放電線上に一様に発生することが肥大防止のいま一つの基本的条件となる。

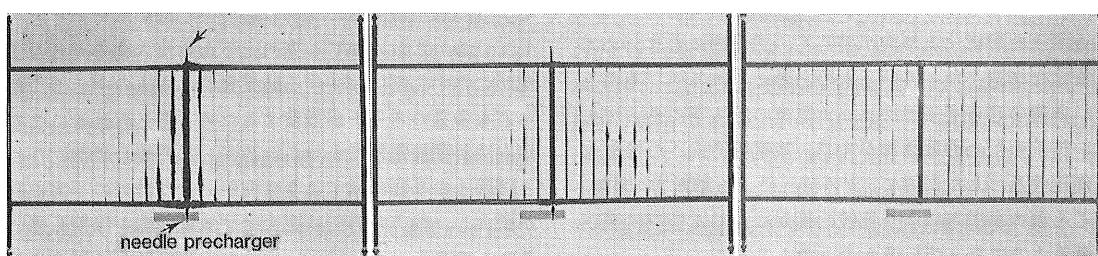
また、放電線を通電加熱すると肥大はまったく生じないことも判明した。この場合は加熱に伴って著しいコロナ振動が発生するので肥大の抑止が加熱自体によるもの (たとえば加熱に伴うコロナ電流の増加、熱反発効果すなわちサーモフォレシス (thermophoresis)、または加熱による酸化反応の促進効果等) か、放電線のコロナ振動によるものかは明らかでない。しかしながら、放電線の通電加熱は常時かなりの加電電力を要するのでコストの上昇を伴ううえコロナ振動の活発化により放電線の疲労



$E = -6\ \text{kV/cm}$, $v_{\text{gas}} = 0.25\ \text{m/s}$, $T_{\text{gas}} = 50^\circ\text{C}$, $v_{\text{belt}} = 0\ \text{cm/s}$, after 120 min and inlet soot concentration = $120\ \text{mg}/\text{Nm}^3$

図 1 ベルト上のストークの堆積状況 (ベルト停止状態で捕集)

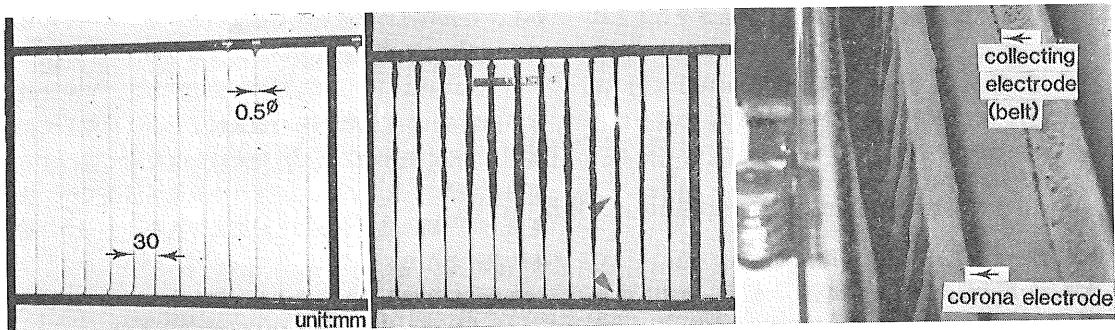
Fig. 1 Tree-like soot deposition on collecting electrode (belt stopped).



(a) belt stopped
 $E = -6\ \text{kV/cm}$, $v_{\text{gas}} = 0.25\ \text{m/s}$, $T_{\text{gas}} = 50^\circ\text{C}$, after 120 min and inlet soot concentration = $120\ \text{mg}/\text{Nm}^3$

図 2 ベルト上のストーク堆積様態による放電極肥大状況の差異

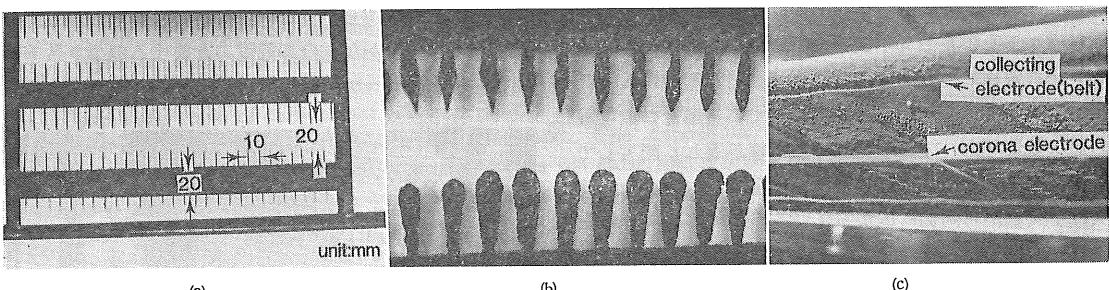
Fig. 2 Variation of soot deposition mode on wires affected by soot deposition on collecting electrode.



(a) clean wires (b) contaminated wires (after 120 min) (c) inside view of MBEP (after 120 min)
 $E = -6 \text{ kV/cm}$, $v_{\text{gas}} = 0.25 \text{ m/s}$, $T_{\text{gas}} = 50^\circ\text{C}$, $v_{\text{belt}} = 0 \text{ cm/s}$, $d_{\text{corona}} = 0.5 \text{ mm}$ and inlet soot concentration = 120 mg/Nm³

図3 線型放電極の負コロナ放電時の肥大現象（ベルト停止状態で運転）

Fig. 3 Soot deposition on negative corona wires. (belt stopped)



(a) clean multi-needle electrodes, (b) contaminated multi-needle electrodes (after 120 min; upper needles remain sharp and active while lower ones are covered with soot and dead), (c) inside view of MBEP.

while lower ones are covered with soot film (Fig. 1).

図4 各斜面放電板の角コロナ放電時の肥大現象(ベルト停止状態で運転)

Fig. 4 Soot deposition on negative multi-needle electrodes. (belt stopped)

断線を招くおそれがあるので実用上の価値については十分な検討が必要であろう。

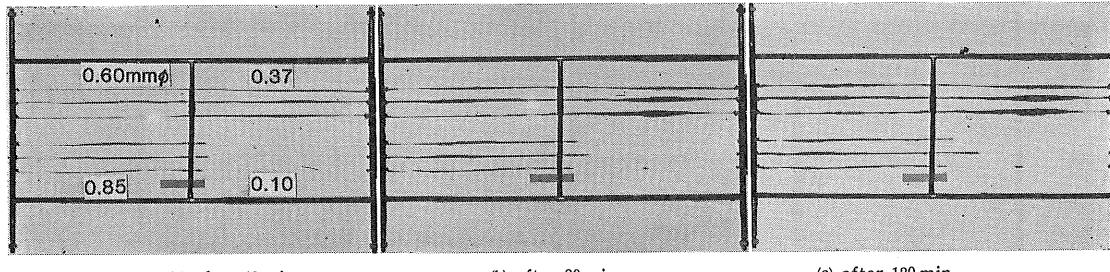
図1の集じん極上堆積ストーの表面をよく観察するとストー堆積層の構造は著しく粗でトリー状(じゅず玉が混在)の堆積が集積したものとなっている。すなわち、抵抗率の低いカーボンストー粒子は等価的に比誘電率が無限大の粒子として振舞うので堆積に際して電界方向にじゅず玉を形成する傾向が著しく、力学的にもきわめて不安定な構造となっているものと考えられる⁷⁾。そのうえ、各個のじゅず玉にはコロナ電流の流入下にあっても低い抵抗のため静電誘導が生じ、放電極方向への吸引力が作用する。したがって、ガス流れによる剪断力、渦動、集じん極の振動等により比較的簡単に集じん空間に飛び出せるようになっているものと考えられる。

3.2 負極性放電極の肥大現象

線型放電極上の負コロナ放電は線径がきわめて小さい（約 $70 \mu\text{m}\phi$ 以下）場合には線上に一様に分布発生するが⁸⁾、線径の増大に伴って点状に分散発生するようにな

る。このことは正コロナ放電との著しい相違で、もし点状のコロナ放電が生ずる場合はそのコロナ点間の線上では肥大の抑制効果がないので、容易に肥大が形成、成長することができる。

線型放電極および多針型放電極に負電圧を印加した場合の肥大状況の写真を図3, 図4に示す。図3からわかるように線型放電極の場合各線の中心部がもっとも肥大している。これは集じん室に上下から流入するガスの主流がこの中心部に集中する結果集じん極上の中心部にもっとも多量のストートが堆積するためと考えられる。この傾向は針型放電極でも見られるが、この場合特徴的なことは図4の写真に示すように向かい合ひ針列の一方のみが肥大し、他方の針先は肥大せず放電能力を保持していることである。これは(1)いずれか一方の針列に属する針の一つがコロナ放電が弱まって肥大を始めると、これが加速されると同時にその左右の針の先端を部分的に遮蔽してそのコロナ放電をも弱め、次々と同一針列上の針に肥大を伝播させていく一方、(2)他方の針列にあっては肥



E = -6 kV/cm, v_g = 0.25 m/s, T_{gas} = 50°C, v_{belt} = 0 cm/s and inlet soot concentration = 120 mg/Nm³

図 5 放電線の直径による肥大速度の差異（負極性；ベルト停止下で運転）

Fig. 5 Variation in soot deposition rate with different wire diameters. (belt stopped)

大針列がイオン空間電荷を放出しないため、その空間電荷による遮蔽効果がなくなつて逆にコロナ放電が強化されるため肥大が抑制されることによるものと考えられる。すなわち、放電が活発な針先はイオン密度が高い限り再飛散粒子がとどきにくく、またとどいても、別に報告するように、活性化された酸素類イオンに射突されて酸化除去されるという自己回復現象が活発となるので⁹⁾、きれいな表面状態を保つものと考えられる。

図 5 に直径の異なる 4 種類の線型放電極に負の電圧を印加した場合の肥大速度の差異を示す。120 分後の肥大の程度は線径で $0.37 \text{ mm}\phi > 0.60 \text{ mm}\phi > 0.85 \text{ mm}\phi > 0.10 \text{ mm}\phi$ の順序であつて、 $0.37 \text{ mm}\phi$ の線は 16 mmまで肥大した。一方、 $0.10 \text{ mm}\phi$ 線はほとんど肥大していない。このような順序になる理由は明らかではないが、直径によるコロナ放電強度の差異とコロナ振動の差異等が考えられる。すなわち直径が細いほどコロナ放電が強く、その分布が一様になると同時にコロナ振動の励振作用も強くなるものと思われる。 $0.10 \text{ mm}\phi$ の細線での肥大が起こりにくいのはこのためと思われる。一方コロナ振動は線の固有振動数で発生し、その振幅は直径を含めた線の機械インピーダンスに左右されるはずである。したがって、これらの要素の総合効果として上述の順序が生じたものと予想されるが、その詳細な研究は今後の課題である。しかしながら、 $0.10 \text{ mm}\phi$ 線でもいつたん肥大が始まると徐々に成長していくことは図 5 からも明らかである。

図 6 は直径の異なる放電線の肥大率、 r_e/r_0 の時間特性を示す。ただし、 r_0 は初期半径、 r_e は肥大時の最大半径を示す。線径 $0.37 \text{ mm}\phi$ の線の肥大速度がきわめて大きい。 $0.60 \text{ mm}\phi$ と $0.85 \text{ mm}\phi$ の間には大差がなく、その肥大速度は小さい。

3.3 正極性放電極の肥大現象

一般に線型放電極上の正コロナ放電は線上に一様に分布発生するので、この点だけに着目する限り、放電線の

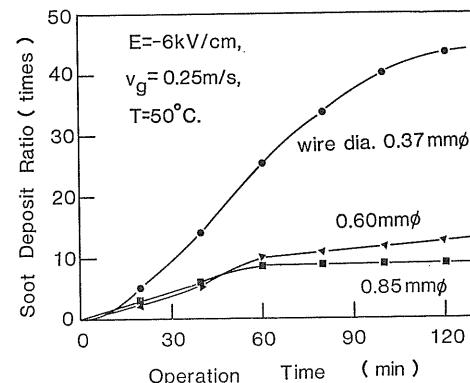


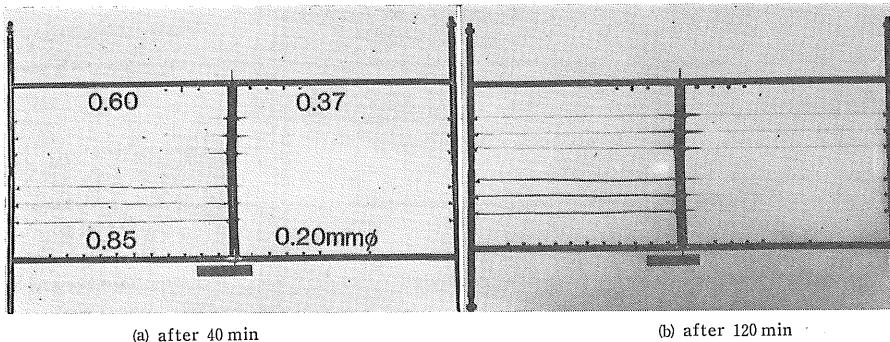
図 6 放電線直径が肥大率の時間的上昇に及ぼす影響(ベルト停止状態で運転)

Fig. 6 Time increase in soot deposition ratio for different wire diameters. (negative corona and belt stopped)

肥大抑制効果上正コロナ放電のほうが有利と考えられる。

図 7 に直径の異なる 4 種類の放電線に正電圧を印加した場合の肥大状況を示す。120 分後の肥大の程度は線径で $0.85 \text{ mm}\phi > 0.60 \text{ mm}\phi > 0.37 \text{ mm}\phi > 0.20 \text{ mm}\phi$ の順序で、負極性の場合と異なつて直径の大きいほど肥大も大きい。正コロナの場合には分布の一様性は線径によらないので線径が小さいことによるコロナ放電の活発化がただちに肥大抑制効果の大小に反映するものと考えられる。直径 $0.85 \text{ mm}\phi$ の放電線では実験時の印加電圧 18 kV ではコロナ放電が開始しないので肥大はもっとも大きい。 $0.37 \text{ mm}\phi$ と $0.20 \text{ mm}\phi$ のものでは活発なコロナ放電が一様に発生するため肥大はほとんど生じない。

なお、針型放電極の場合は正電圧の印加により正ストリーマが発生進展するため火花電圧が大幅に低下し実用上の価値が乏しいので肥大テストは省略した。



E = +6 kV/cm, $v_{\text{gas}} = 0.25 \text{ m/s}$, $T_{\text{gas}} = 50^\circ\text{C}$, $v_{\text{belt}} = 0 \text{ cm/s}$ and inlet soot concentration = 120 mg/Nm³

図 7 放電線の直径による肥大速度の差異 (正極性; ベルト停止状態で運転)

Fig. 7 Variation in soot deposition rate with different wire diameters. (belt stopped)

4. 肥大放電線の自己回復現象

著者らはいったんカーボンストーの付着により肥大した放電線に清浄空気霧囲気中で、正または負の高電圧を印加し、コロナ放電を発生せしめると付着ストーが時間とともに消失し放電線が清浄な状態を回復することを見いだした^{4,5,9)}。その機構についてはコロナ放電の結果発生する O^- , O_2^- , O_3^- , OH^- , $(H_2O)_nO_2^-$ などのイオンが強い電界で加速されて放電線上のストーに射突することによる酸化反応(正コロナの場合)とスパッタリング効果、およびコロナ放電域に発生する励起酸素 O , O_2^* , O_3 等(正および負コロナ)、およびこれらの正イオン O^+ , O_2^+ , O_3^+ による酸化反応(負コロナ)の場合が考えられる¹⁰⁾。また、放電線振動による機械的な剥離も発生している。したがって、放電線の肥大現象はストーの付着過程と上記の自己回復過程との拮抗による総合効果として発生するものといえる。この自己回復過程については詳細な研究を行ない、その結果については別個に報告するが⁹⁾、ここではその現象論的観察の結果について報告する。

4.1 負極性肥大放電線の自己回復

図 8 に示すような同軸円筒電極の密閉電気集じん装置内の中心軸上にあらかじめストーを堆積させた放電線を絶縁張架して負の高電圧を印加しその自己回復状況を調べた。

図 9 は実験前後の放電線の拡大写真である。全体としては、両端部よりも電界が強い中央部のほうの回復程度が良好であるが、自己回復の行なわれる位置は負コロナ放電の場合、コロナが点状に生ずることに対応してコロナ点部位に限られ、電界が強い中央部でもコロナ点の間ではストーが残留している。このことは負コロナ放電が激しく発生している線上でもコロナ点とコロナ点の間で

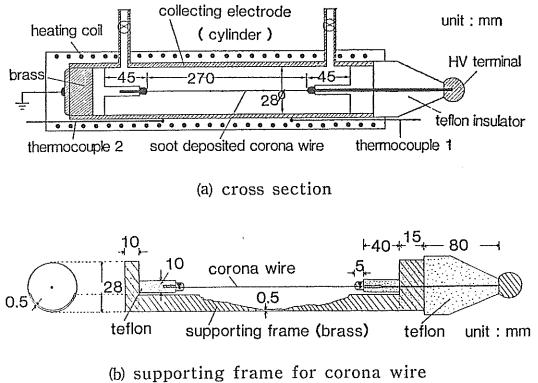


図 8 放電線の自己回復現象の実験装置

Fig. 8 Test cell for investigating corona-induced self-cleaning phenomenon of soot contaminated wire.

はストーの付着が可能であることを示している。そしてこの放電の不活性区域にいったんストーが付着すると、この区域には自己回復作用がないので、ストーの付着層は成長し隣接コロナ点の電界を弱め、コロナを阻止し、ついに線全体まで肥大が進展するものと考えられる。この場合コロナ点では自己回復作用が存在するが、コロナ点間にコロナの発生しない区域が存在することが負コロナ放電の本質的な弱点で、この区域からの肥大進展速度がコロナ点からの自己回復進展速度を上まわると線全体の肥大を生ずるものと考えられる。

4.2 正極性肥大放電線の自己回復

図 10 は図 9 と同一条件下で放電線に正電圧を印加した場合の自己回復状況の拡大写真である。この場合には放電がもっとも活発な中央部分で最初にストーが消失し、清浄部分が両側に進展していく。このようにまだらな地点の発生なしに自己回復が進展するのが正極性放電線の大きな特徴で、その理由は正コロナが回復途上の線

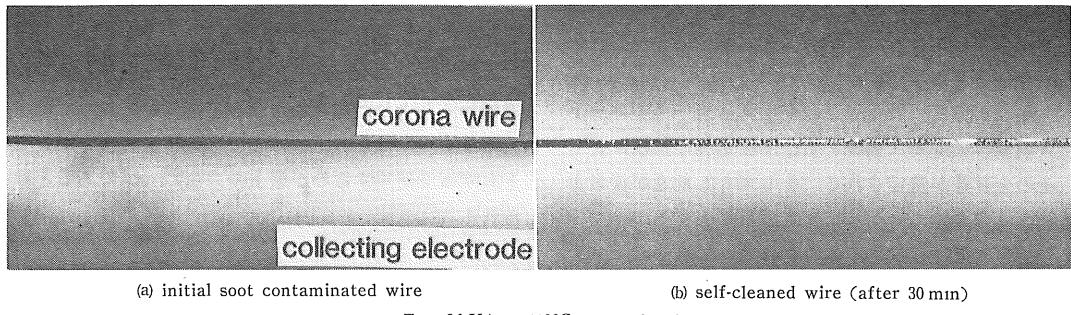


図 9 肥大放電線の負極性コロナによる自己回復状況

Fig. 9 Negative corona-induced self-cleaning of soot contaminated wire.

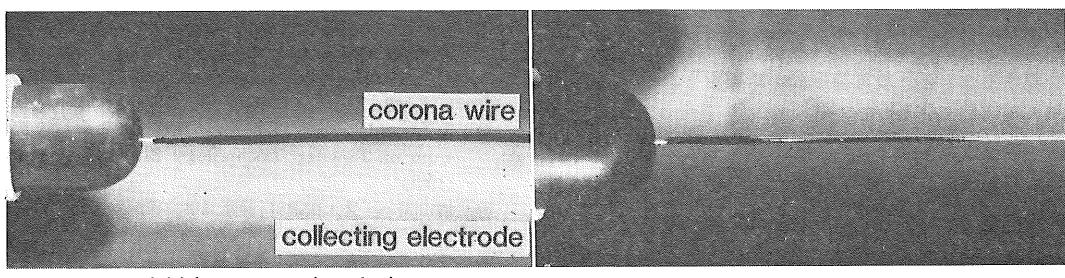


図 10 肥大放電線の正極性コロナによる自己回復状況

Fig. 10 Positive corona-induced self-cleaning of soot contaminated wire.

上に一様に分布発生することである。逆に、正極性での肥大過程について考えてみると肥大は放電が弱い両端部から起り、中央部のほうに伸びていくものと考えられる。したがって、自己回復と肥大のバランスする位置で判然とした両者の境界が生ずるものと予想され、線全体にわたってバランスがくずれると全部が清浄になるか肥大するかのいずれかに落ちつくものと見られる。

5. 結 論

線型放電極および多針型放電極のカーボンストートによる肥大過程と、線型肥大放電極の自己回復過程に関する現象論的観察を行なった結果次の結論が得られた。

(1) カーボンストートに関する限り正極性および負極性コロナ放電極への付着機構のなかで、支配的なものは集じん極上にいったん集じんされたストート堆積層からの再飛散粒子の放電極への付着現象である。これは集じん極上の堆積層がきわめて不安定で、再飛散を生じやすいというカーボンストートの特殊性によるものと考えられる。再飛散粒子は静電誘導により放電極と逆極性の電荷をもって放出されるが、コロナ放電の旺盛な放電極部位には逆荷電・反発作用を受ける結果付着しにくく、放電が弱い場所ないし放電の生じていない場所に付着する。

(2) したがって、負コロナ放電線にあっては線径が極端に細い ($70 \mu\text{m}\phi$ 以下) 場合を除くとコロナ放電が点状に生ずるのでそのコロナ点の間の区域で肥大が始まる。また、正コロナ放電にあってはコロナ放電は線上に一様に発生するが、電界集中が弱くコロナの不活発な放電線端部から肥大が始まる。いったん肥大が局部的に生ずると隣接放電線部位の電界が低下し、コロナ活動が弱められるのでその肥大が線上を横方向に伝播する傾向をもつ。いざれにせよ、この過程に着目する限りコロナ放電が一様に発生分布するもの、すなわち負極性の放電線では細線が、また一般的には正極性の放電線が肥大抑制の点で有利である。

(3) 放電極に発生するコロナ放電はたんに飛来粒子を反発してその付着を抑制する作用のみではなく付着カーボンストートを消失せしめる自己回復作用を呈する。その機構は放電により発生した酸素系イオンないし活性酸素系分子の酸化作用や、その他の正・負イオンのスパッタリング作用がおもなものと考えられるが、放電線のコロナ振動によるストートの機械的剥離効果も存在する。

(4) この自己回復作用は負極性放電線でコロナが点状に発生する場合にはコロナ点にのみあらわれ、コロナ点間の不活性区域では自己回復作用が存在しない。また正

極性放電線では電界が強くコロナの活発な中央部分において自己回復作用がもっとも著しく、線の清浄な部分がこの中央部から両端へと進展する。

(5) したがって、放電線上に発生するカーボンストーントの肥大現象は結局肥大過程と自己回復過程の拮抗によって、その全体像が決定される。そしてもし前者が後者を上まわれば線全体にわたって肥大成長が生ずる。

(6) 放電線に通電加熱することによってもその肥大を有効に防止することができる。その機構としては放電線温度の上昇による熱反発効果(粒子が放電線方向からより大きな速度の分子衝突を受けることによる),酸化反応の促進、コロナ電流の上昇とその分布の均一化、コロナ振動の促進等が考えられるが、その詳細は明らかでない。この方法はそれ自体きわめて有効ではあるが、加熱に電力を要することと、放電線振動が断線をもたらす点に問題がある。

(7) 針型放電極列を互いに相対向させて配列する場合は一方の針列のみが著しく肥大する反面、他方の肥大は大幅に抑制され、コロナ放電を持続させることができ。これは針先同士の距離を大きくすることによって防止でき、両針列とも肥大を抑えつつコロナ放電を続行せしめるものと考えられる。

以上の結果を総合して自己回復作用を促進するとともにストーントの付着肥大を抑止するような構造の放電極の用することにより、特別な方法を講じなくても放電極の

ストーントによる肥大を防止できる可能性があることがわかった。

一方、ディーゼル排気用の電気集じん装置の放電極は機械的にも十分な強度をもたせる必要があるので細線の使用は適当ではない。この点で多針型放電極を改良のうえ負電極で使用するのが最上の方法の一つであると考えられる。

参考文献

- 1) 増田閃一, 文 在徳: 静電気学会講演論文集 '80, p. 1, 静電気学会 (1980)
- 2) S. Masuda, J. D. Moon and K. Aoi: International Clean Air Congress, Buenos Aires, Argentine (1980)
- 3) S. Masuda and J. D. Moon: Proc. of the U.S.-Japan Seminar on Measurement and Control of Particulates Generated from Human Activities, p. 6. 38, EPRI, CS-2145-SR (1981)
- 4) S. Masuda and J. D. Moon: International Symposium on Powder Technology 81, Kyoto, Japan (1981)
- 5) 増田閃一, 文 在徳: 静電気学会講演論文集 '81, p. 165, 静電気学会 (1981)
- 6) 増田閃一, 文 在徳: 静電気学会誌, 6 (1982) 186
- 7) 静電気学会編: 静電気ハンドブック, p. 539, オーム社 (1981)
- 8) 増田閃一, 新岡正樹: 電気学会論文誌B, 95 (1975) 423
- 9) 増田閃一, 文 在徳: 静電気学会誌, 6 (1982) 327
- 10) S. Badaloni and I. Gallimberti: UPee-72/05 (1972)