論 文

電気集塵装置からのオゾン発生の抑制技術

片 谷 篤 史*¹,細 野 洋*,村 田 光*,水 野 彰** (2008年1月7日受付:2008年9月29日受理).

Reduction of Ozone Generation in an Electrostatic Precipitator

Atsushi KATATANI^{*,1}, Hiroshi HOSONO^{*}, Hikaru MURATA^{*} and Akira MIZUNO^{**} (Received January 7, 2008; Accepted September 29, 2008)

Electrostatic Precipitator (i.e. ESP) has recently been utilized for environmental protection of purifying road tunnel exhaust. ESP can remove soot from automobiles by charging with corona discharge. In the meantime, corona discharge generates ozone (O_3) . Nitrogen dioxide (NO_2) , a toxic gas element, then, increases undesirably, contrary to the purpose of environmental protection because O_3 oxidizes nitrogen monoxide (NO) contained in tunnel exhaust gas into NO₂. We examined the effect of electrode geometry and polarity of corona discharge on ozone generation. As a result, a method has been developed to minimize ozone generation associated with corona discharge in ESPs.

1. はじめに

この十数年間の環境意識の高揚から,自動車道路トンネル の換気所から排出されるトンネル排気中の SPM (Suspended particle matter, 浮遊粒子状物質)を除去するニーズが高まっ ている.従って,トンネル換気所の排気風路内に環境対策用 の電気集塵装置を設置する例が増加している¹⁾.日本の都市 部におけるトンネル排気性状の例を表1に示す.

トンネル用電気集塵装置は、高風速の処理に適した、帯電 部と集塵部から成る2段集塵方式(図1参照)である.その

| 表 1 | 都市部トンネルの典型的な排ガス性状 | |
|-----|-------------------|--|
| | | |

| Table 1 Typical properties of exhaust gas in urban tunne |
|--|
|--|

| | | Day average | Fluctuation range |
|-----------------|---------------------------------|------------------------|----------------------------|
| SPM | Suspended Particulate Matter | 0.20 mg/m ³ | $0\sim 2.0 \text{ mg/m}^3$ |
| NO ₂ | Nitrogen dioxide | 0.1 ppm | 0.05~1.5 ppm |
| NOx | Nitrogen oxides | 1 ppm | 0.5~5 ppm |

- **キーワード**:電気集塵装置,オゾン発生量,トゲ式放電極, コロナ放電,正・負荷電
- * 松下エコシステムズ株式会社(486-8522 愛知県春日井市 鷹来町字下仲田 4017番) Matsushita Ecology Systems Co., Ltd., 4017, Takaki-cho
- Kasugai-city, Aichi-pref. 486-8522, Japan ** 国立大学法人 豊橋技術科学大学 (441-8580 愛知県豊橋 市天伯町雲雀ヶ丘 1-1) National University Corporation Toyohashi University of Technology, 1-1, Hibarigaoka, Tenpaku-ku, Toyohashi-city, Aich-pref. 441-8580, Japan
- ¹ katatani atsushi@jp.panasonic.com



図1 2 段集塵方式の構造と原理図 Fig. 1 Structure and theory of two stage type ESP.

基本仕様は日本道路公団(現,日本高速道路㈱)の「機械電 気通信機材仕様書」における「トンネル用電気集塵機設備標 準仕様書」である.当該仕様書には高風速化・高集塵効率化 の観点から2度の改定が加えられ,表2の変遷をたどってい る.一連の高性能化(高風速化・高集塵効率化)の結果,電 気集塵装置の単位風量当りの消費電力は増加した.一方で近 年,電気集塵装置から発生するオゾンが,トンネル排気中の 一酸化窒素と反応し,有害な二酸化窒素の増加を招くことが 問題視されつつある.トンネル用電気集塵装置に関わる各ガ ス成分の規制値をまとめると表3となる.

電気集塵装置からのオゾン発生は不可避な現象と言える が,高性能化技術とオゾン抑制化技術の両立が環境対策用の 電気集塵装置には必要である.

| 表2 | トンネル用電気集塵装置の仕様の変遷 |
|----|-------------------|
| | |

| Specification | First edition (1987) | Revision 1 (1996) | Revision 2 (2006) |
|--|-------------------------|----------------------|-------------------------|
| Velocity [m/s] | 7 | 9 | 9 |
| Polarity | Positive | Negative (※2) | Positive or Negative |
| Discharge pole | Wire | Wire | Spike |
| Soot Collection [%] | 80 | 80 | 90 |
| Power Consumption per unit gas flow [W/(m ³ /s)] | (Approx. 35) ※1 | 55 | 110 |

 Table 2
 Specification revisions of tunnel ESP for road tunnel.

※1:1987 年版に消費電力の規定は無かったが、当時は、 概ね() 内の数値であった.

※2:1996年の改訂では、コンパクト化の観点から、より 高風速化され、また、放電線の断線故障率が正荷電方式よ りも低い負荷電方式が仕様化された.

※3:2006年の改訂では集塵効率が高められ、また、断線 故障を回避するために、トゲ電極が仕様化された.

表3 ガス成分の規制値一覧

Table 3 Regulation value of gas elements .

| Gas | Chemical symbol | Environmental standard (1 hour) | Permissible Density (※1) | ACGIH (※2) |
|---------------------------------------|--------------------|--|--------------------------------|---------------|
| Nitrogen monoxide | NO | None | none | 25 ppm |
| Nitrogen dioxide(NO ₂) | NO_2 | 0.04~0.06 ppm | none | 1 ppm |
| Ozone O ₃ | | None (Existing as oxidant 0.06 ppm) | 0.1 ppm | 0.1 ppm |

※1: recommendation of Japan Association of Industrial Health;日本産業衛生学会の許容濃度勧告.

※2: American Conference of Government Industrial Hygienist; 米 国産業衛生監督会議.

一般に、オゾン発生量は正荷電の方が負荷電よりも少ない ことが知られている²⁾.(図2は、トンネル用電気集塵装置と して長年使用されてきた放電線電極の場合の自社内での実 験結果である。)一方、放電線電極の場合、断線故障が不可 避であり、電気集塵装置の維持管理面において不都合を招い ていた.そこで、断線故障が発生しないトゲ放電極が着目さ れ、オゾン発生量が放電線電極の正荷電と同レベルの特性を 有するトゲ放電極が求められるようになった.過去には、ト ゲ放電極の板厚や材質の違いによるオゾン発生量の変化を 示す報告³⁾、また板厚とストリーマの関係を示す報告⁴⁰など が発表されている。今回、各種形状のトゲ放電極のオゾン発 生量を比較し、オゾン抑制の可能性を見出すこととした.



図2 正・負コロナ放電のオゾン発生特性

Fig. 2 Characteristics of ozone generation by positive or negative corona discharge.

2. 実験手順

本実験では、帯電部のトゲの構造を変化させることにより、 放電電流、オゾン発生量および集塵効率がどのように変わる かを調べることを目的とした.図3に実験装置の構成を、ま た表4に仕様および条件を示す.風上側に、粉塵の発生源で あるディーゼルエンジン発電機の排気口を配置し、風下側に 向かって帯電部・集塵部を、そして最も風下側にインバータ 制御による風量可変式の通風ファンを配置した.帯電部の風 上側約2mおよび集塵部の風下側約3mの位置に粉塵濃度と オゾン濃度の計測端を設けた.正荷電と負荷電の両者につい て測定を行なった.直流の高圧電源には電圧計および電流計 が備わっており、出力電圧のリップル(脈動)は±3%以内で ある.





Fig.3 Schematic diagram of tested ESP.

表4 実験装置の仕様および実験条件

Table 4 Specifications and conditions on experiments.

| Items | Details | | |
|---------------------------|---|--|--|
| Duct | W;940mm , H;780mm , L;12,500mm | | |
| Flow rate | 0.17 m ³ /s for measuring ozone 5 m ³ /s for measuring soot collection (9m/s for line velocity in ESP) | | |
| Ionizing | (Positive discharge) W;900mm , H;720mm , L;300mm (Negative discharge) W:900mm H:720mm L:170mm | | |
| section | W;900mm , H;720mm , L;170mm (Common) Material of spikes and plates;SUS304 Thickness of spikes and plates; 0.5mm Voltage; Variable (positive or negative) | | |
| Collecting section | (Common for positive and negative) W;900mm , H;720mm , L;800mm Material of plates; SUS304 Thickness of plates; 0.4mm Voltage; 9kV (positive or negative) Gap of adjoining plates; 10mm | | |
| Meters | For ozone ; APOA360 type (HORIBA, ultraviolet absorption) For soot concentration ; AP632T type (SHIBATA, light scattering) | | |
| Diesel engine | Type: 4BD1-T (ISUZU) Displacement volume:4000cc | | |
| High voltage power supply | Controlled phase by thyristor and duplicated voltage type (Origin Electric) Max. rate DC±12kV, 150mA | | |

図 4 にトゲ式放電極の写真を示す.トゲ形状を先端角度 (Angle), 高さ (Height), ピッチ (Pitch),トゲ放電極間 隔 (Gap) で表現し, Angle と Pitch を変化させた. Height は 10 mm に, Gap は 12 mm に固定した.本実験におけるトゲ形 状の実験条件を表 5 に示す.

放電電流および集塵効率を測定する場合は、処理風量を5 m³/sとし、粉塵濃度を約0.5 mg/m³とした. オゾン発生量を測

| Table 5Condition of spike electrode. | | | |
|--------------------------------------|----------------|---------------|---|
| Experimental case | Angle [deg] | Pitch [mm] | Unit per power consumption [W/(m ³ /s)] ※1 |
| \bigcirc | 20 | 4 | 98 |
| 2 | 30 | 4 | 126 |
| 3 | 40 | 4 | 103 |
| 4 | 20 | 8 | 56 |
| 5 | 30 | 8 | 108 |
| 6 | 40 | 8 | 117 |
| \overline{O} | 20 | 12 | 70 |
| 追加⑧※2 | 30 | 12 | 174 |
| 追加⑨※2 | 40 | 12 | 103 |

表5 トゲ形状の実験条件

※1:図8の実験における実験条件を示す.

※2:図8の実験のみ実施した.

定する場合は、オゾンの発生量をより正確に測るために、処 理風量を 0.17 m³/s に下げて実験した. その際、帯電部で生成 したオゾンがディーゼル排気と反応することを避ける目的 で、ディーゼルエンジン発電機は停止した.

3. 結果と考察

図5に放電電流の電圧特性を示す.負荷電の場合,各条件 で同様の傾向を示し,印加電圧の上昇に対する放電電流の増 加の割合は,形状によらずほぼ一定である.負荷電では安定 なグロー領域の放電が発生するためである.一方,正荷電の 場合,放電電流の増加度合がトゲ形状によって異なる.これ は正荷電ではストリーマ放電に進展しやすく⁴⁾,トゲ形状に よってストリーマへの移行条件が異なるからである.

次に図6にオゾン発生特性を示す.尚,条件②③は欠測した.負荷電の場合,消費電力に対するオゾン発生量の傾向は 形状によらずほぼ一定であり,正荷電の放電線と比較して約 5倍である.



Fig. 4 Composition of spike electrode.

Fig. 5 Discharge current as a function of applied voltage.





一方,正荷電の場合,オゾン発生特性はトゲの形状・構造に 大きな影響を受けている.トゲの形状・構造・電界強度によ り,放電形態が変化するためと考える.中でも特徴的である のは,消費電力の増加に対してオゾン発生量が一時的に少な くなる傾向が見られることである.この傾向が最も顕著な条 件⑦に関しては,オゾン発生量の極小値は,放電線電極の正 荷電方式とほぼ同じレベルとなっている.この特徴的な傾向 が見られる原因を把握するため,条件⑦のトゲ形状を用いて 放電の様子と電流波形を確認した.図7にその結果を示す.

条件⑦について、コロナ放電開始から消費電力が約50 W/ (m³/s)迄の、 消費電力の増加と共にオゾン発生量が増加する 範囲(領域1とする)では、図7(1)に示すようにコロナ放電 はブラシ状に伸びている.ブラシコロナに分類される放電様 態である^{2,5)}.電流波形は、数十µs 周期のパルス状の脈動波 形が観測され、電圧の上昇(消費電力の増加)と共にパルス の振幅は大きくなった.



- Sensitivity: ISO 1600, Shutter speed: 30sec.
- Oscilloscope: Tektronix DPO4104, Probe: Tektronix TCP312 Horizontal axis: 40 μ s /div. Vertical axis: 10mA/div.

次に消費電力約 50W/(m³/s)から約 150W/(m³/s)迄の,消費 電力の増加に対してオゾン発生量が減少する範囲(領域2と する)ではブラシ状に伸びたコロナ放電が無くなり,図7(2) に示すようにトゲ先端部で球状のコロナ放電が発生した.グ ローコロナ放電に分類される放電様態である²⁾.同時に,ト ゲ先端部のみならず放電極の端部全体から接地極板に向か って,均一なエアカーテン状の微弱な放電が目視で確認され た.一方,電流波形は領域1で増大したパルス状の脈動波形 の振幅が,徐々に小さくなることを確認した.

消費電力約 150 W/(m³/s)以上の,再び消費電力の増加と共 にオゾン発生量も増加する範囲(領域 3 とする)では,図 7(3) に示すように接地極近辺まで延びたストリーマが観測され た.ストリーマコロナ放電に分類される放電様態である²⁾. 電流波形は,再びパルス状の脈動波形となり,その振幅が領 域1 より大きくなっている.

条件⑦以外の条件④⑤⑥についても,消費電力の増加に対 してオゾン発生量が減少する領域が存在した.この領域を領 域2と定義する.(また,消費電力がそれより小さい領域を 領域1と定義し,それより大きい領域を領域3と定義する.) 条件④⑤における領域2は,消費電力約170W/(m³/s)から約 270W/(m³/s),条件⑥では,消費電力約250 W/(m³/s)から約 350W/(m³/s)(図示せず)の範囲である.これら各条件の領域 2の範囲では,放電様態はグロー放電であった.

最後に条件①について、オゾン発生量はコロナ放電開始と 共に増加し、図示していないが消費電力 318 W/(m³/s)、オゾ ン発生量 1.13 ppm まで直線的に増加した.オゾン発生量が 減少する範囲は確認できなかった.条件①の放電様態は、消 費電力約 50 W/(m³/s)まではブラシコロナが観察され、それ以 降はストリーマコロナが観察された.

このように放電様態観測の結果,オゾンの発生量は放電様 態に依存していることが判明した⁶.

一般に正荷電の放電様態は電界強度の上昇とともにブラ シコロナ⇒グローコロナ⇒ストリーマコロナに遷移すると 言われている²⁾. 今回の実験結果においては,領域1がブラ シコロナ領域,領域3がストリーマコロナ領域,そして,領 域2は,ブラシコロナから膜状グローコロナに移行した領域 である.領域2の存在は実験目的の探求に有効で,正荷電に おいて領域2の特性を有するトゲ形状を選択すれば,オゾン 発生量を抑制できる可能性があるものと考えた.

図8は、電界強度を0.67 kV/mm(Gap12 mm、印加電圧8 kV) にて一定とし、横軸をトゲピッチ、縦軸をオゾン発生量とし たグラフであり、各プロット近傍の括弧内の数字は領域1~ 領域3に対応している.実験条件は表5の①から⑨とした. 尚、欠測した条件②③は再測定した.これより、正コロナ放



Fig. 8 Ozone concentration as a function of spike pitch.

電においては、トゲピッチが大きいほどオゾン発生量は少な くなる.逆に、トゲピッチが狭い程オゾン発生量が多くなる のは、電界の不平等性が緩和され、空間の電界強度が高くな るため、ブラシコロナの形態にはならず、接地板近辺までス トリーマが延びる様態でコロナ放電が発生していたからと 推察する^{5,7,8,9)}.よって、ストリーマコロナの空間領域が大き いため、オゾン生成が顕著に行なわれたものと考えている. トゲピッチが広がるにつれて、トゲ先端への電界集中が顕著 となり、空間の電界強度が低下してストリーマの伸展が抑制 され⁸⁾、グローコロナへ移行するためオゾン生成の抑制につ ながったと推察する.また、正荷電のストリーマコロナ領域 におけるオゾン生成量が、負荷電のグローコロナ領域のオゾ ン生成量より高くなる場合があることが確認できた.

図9に電極条件(表5,①~⑦)と集塵効率の関係を示す. 消費電力を50 W/(m³/s)一定に保ち,集塵効率を測定した.

負荷電の場合, いずれの条件においてもほぼ 80%前後の 集塵効率が得られた.これは安定なグロー放電が発生したた め¹⁰⁻¹²⁾と考える.

一方,正荷電の場合,実験条件によって集塵効率に相違が 見られる.トゲ先端角が20度の条件①(ピッチ4 mm),④ (8 mm)および⑦(12 mm)を比較すると、トゲピッチを 広げた方が、集塵効率が高くなっている.先端角が30度の 条件②(ピッチ4 mm)と⑤(8 mm)を比較してもピッチの 広い方が集塵効率は高くなっており、さらに、先端角が40 度の条件③(ピッチ4 mm)と⑥(8 mm)を比較しても、ピ ッチの広い方が、集塵効率が高くなっている.この理由は、



Fig. 9 Collection efficiency in each case.

次のように考えられる. 今回の実験条件であるトゲ形状の高 さが 10mm,角度が 20 度から 40 度,トゲ放電極間隔 12 mm に おいては,トゲピッチが狭いとストリーマコロナの形態にな りやすく⁵⁾,ストリーマ中では正負両極性のイオンが存在す る⁸⁾.このため,荷電効率が低下する⁴⁾ことが考えられる.ま たストリーマはチャンネルが細長く伸展するため,相並ぶト ゲの中間位置では,イオン密度も低下すると考えられる.即 ち,ストリーマコロナの場合,荷電空間のイオン分布に,疎 な部分と密な部分が生じ,粉塵への帯電効果が低くなるため, 集塵効率が低下すると推測する.ところが,トゲピッチが広 いと,ストリーマの伸展が抑制され,トゲ近傍に電離部が限 定される.そこから正イオンが電界に沿って荷電空間に運ば れるため,荷電空間中のイオン分布の均一性が高まり,塵埃 への荷電が良好に行われる.その結果,集塵効率が高まると 推察される.

4. 結論

オゾン発生量の少ない電気集塵装置を実現するために, 帯電部のトゲ電極を構成する条件(トゲ先端角,トゲピッチ) を変化させ,オゾン発生量と集塵効率を評価した.得られた内 容をまとめると以下の通りである.

- (1) 負荷電の場合、トゲの構成条件が異なっても、放 電電流特性、オゾン発生特性および集塵効率特性に 顕著な差異はなかった.
- (2) 正荷電の場合、トゲの構成条件が異なると、放電電 流特性、オゾン発生特性および集塵効率特性に顕著 な差異が認められた。
- (3) 正荷電の場合、トゲ形状によっては消費電力の増加 とともにオゾン発生量が低下する領域があること を確認した.これは、放電様態がストリーマを伴う ブラシコロナからグローコロナに移行する領域が 存在するためである.
- (4) 正荷電の場合、トゲのピッチが広い方が、オゾン 発生量が小さく、かつ集塵効率が高い.
- (5) ピッチ 4mm の場合においては、正荷電の方が負荷 電よりもオゾン発生量が増大した.正荷電において、 この条件でピーク電流の大きなストリーマが発生 したためと考えられる.

欧州では、地球温暖化の抑制に対する動きが強化されつつ ある. 今後は、オゾン発生を更に抑制できる電気集塵技術を 探求するとともに、消費電力の少ない電気集塵技術について も検討を進める予定である.

参考文献

- 水野 彰: 2007 年度第一回静電気学会研究会予稿集, p 38-82, 静電気学会 (2007)
- 2) 静電気学会:新版 静電気ハンドブック,オーム社(1998)
- 3) 古橋拓也:静電気学会誌, 30, 3 (2006) 146
- 4) 柳下大樹:電気学会プラズマ研究会資料PST-06-35(2006)
 p1
- 5) 三好保憲:静電気学会誌, 10,6 (1986) 552
- 6) 三好保憲:静電気学会誌, 12, 2 (1988) 129
- 7) 三好保憲:静電気学会誌, 1,1 (1977) 52
- 8) 三好保憲:日本物理学会誌, 30,8 (1975) 591
- L.B.Loeb : Electrical Coronas, University of California Press (1965)
- 10) 三好保憲: 材料科学, 8, 1(March 1971) 33
- 11) 三好保憲:静電気学会誌, 10,6 (1986) 543
- 12) 三好保憲:静電気学会誌, 12,1 (1988) 54