

# 大規模道路トンネルにおける空気浄化での電気集塵・脱硝技術

Electrostatic Precipitator and De-nitrification Technology in Air Purification for Large-Scale Road Tunnels

山口 英告  
Hidenori Yamaguchi

村山 将  
Masaru Murayama

細野 洋  
Hiroshi Hosono

村田 光  
Hikaru Murata

片谷 篤史  
Atsushi Katatani

## 要 旨

自動車道路トンネルでは、走行車両が排出するSPM (Suspended Particulate Materials: 浮遊粒子状物質) やNO<sub>x</sub> (Nitrogen Oxides: 窒素酸化物) などの大気汚染物質の除去が必要である。当社では、SPMを除去するESP (Electrostatic Precipitator: 電気集塵 (じん)) 技術については30年以上、NO<sub>x</sub>を除去する脱硝技術については20年以上取り組んできた。本稿では、近年の大規模道路トンネルにおける空気浄化のための電気集塵・脱硝技術および、当社で独自に開発した新方式の電気集塵技術について説明する。

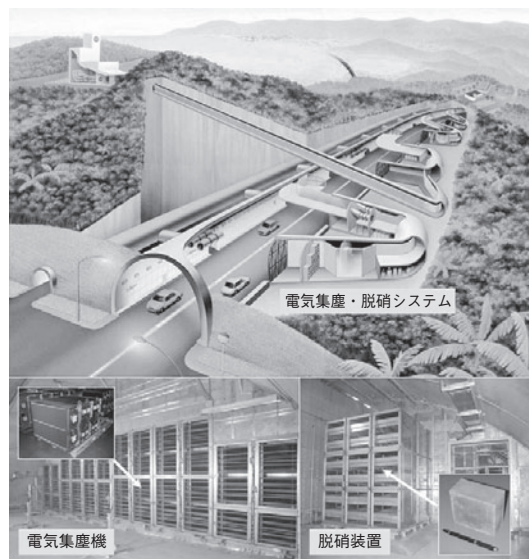
## Abstract

In road tunnels, it is necessary to remove air pollutants such as Suspended Particulate Materials (SPM) and Nitrogen Oxides (NO<sub>x</sub>). We have been developing Electrostatic Precipitator (ESP) technology for more than 30 years, and de-nitrification technology for more than 20 years. In this paper, we describe electrostatic precipitator technology and de-nitrification technology for large-scale road tunnels in recent years, and introduce the technological principles for our new electrostatic precipitator.

## 1. はじめに

自動車道路トンネルでは、一般にCO (Carbon monoxide: 一酸化炭素) 濃度と煙霧透過率 (VI: Visibility Instrument) が管理目標値以下となるように設計・運用される。このうち、VIはドライバーの視界の良好性を示す指標であり、SPM (浮遊粒子状物質) により悪化する。日本では、大規模トンネルでのVI改善を目的として、1978年に初めて電気集塵機が導入された。

近年は、VI改善に加え、道路トンネル周辺に対する環境配慮の観点から、トンネル坑口から排出される空気の浄化が求められるようになってきた。さらに、従来のSPM除去だけでなく、NO<sub>2</sub> (Nitrogen dioxide: 二酸化窒素) も除去する要望が高まり、電気集塵機と脱硝装置を備えたトンネル換気設備が導入されつつある[1]。これらトンネル換気設備の概要を、第1図に示す。本稿では、トンネル周辺環境に配慮した電気集塵技術および脱硝技術について説明する。



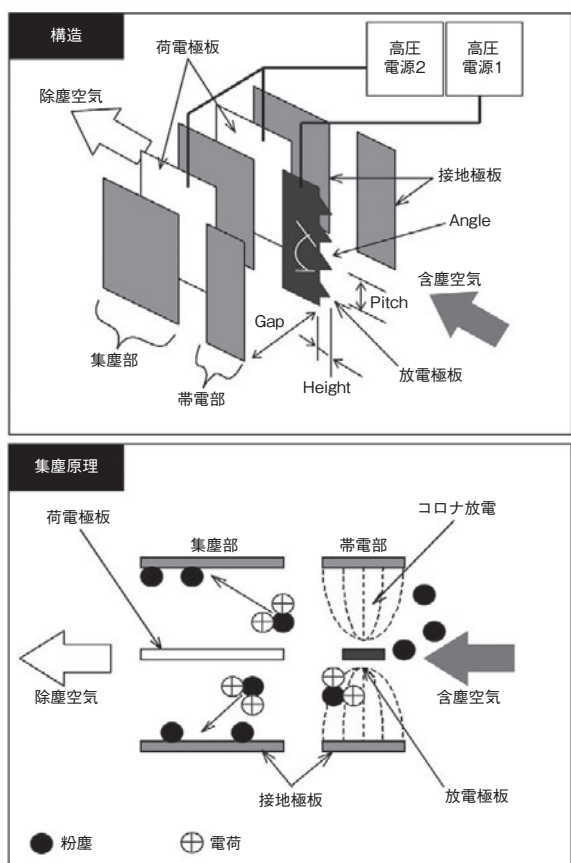
第1図 トンネル換気設備の概要

Fig. 1 Overview of air purification equipment

## 2. 道路トンネル換気用電気集塵技術

### 2.1 電気集塵の原理

第2図に、電気集塵機の構造と集塵原理を示す。電気集塵機は帯電部と集塵部で構成されている。帯電部は複数の突起 (トゲ) を端面に有する放電極板と、接地極板が交互かつ平行に配置されている。一方集塵部は、荷電極板と接地極板が交互かつ平行に配置されている。



第2図 電気集塵機の構造と集塵原理  
Fig. 2 Structure and theory of ESP

帯電部の放電極板に高電圧を印加すると、放電極突起近傍の電界が集中する領域でコロナ放電（局所的な電離現象）が発生する[2]。コロナ放電により、空気中のガス分子が電子とイオンに電離し、これらが空気中の粉塵に付着して粉塵が帯電する。一方集塵部では、荷電極板に印加された高電圧により、接地極板との間に電界空間が形成され、帯電部で帯電した粉塵が静電気力により接地極板上に捕集される。

道路トンネル用の電気集塵機は狭小な空間で大風量进行处理する必要があるため、ほかの産業用集塵機より処理風速が速く、風速9 m/s ~ 13 m/sでSPMを80%以上除去することが可能である。

## 2.2 電気集塵機から発生するオゾンの抑制

電気集塵機はコロナ放電による電離現象を利用して粉塵を帯電させるため、空気中に含まれる酸素が一部オゾンに変化してしまう。オゾンは単体でも人体に有害であるが、NO（一酸化窒素）と反応して有害なNO<sub>2</sub>（二酸化窒素）も発生させてしまう。近年は環境配慮の観点から、単にSPMを除去するだけでなく、オゾンの発生を極

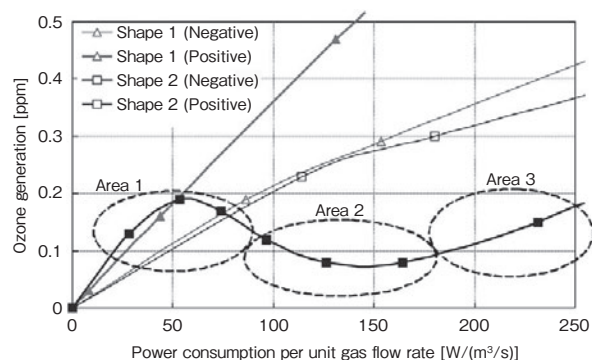
力抑えることが求められている。

一般にオゾンの発生量は、正放電（放電極板に正の高電圧を印加）が少なく、負放電（放電極板に負の高電圧を印加）が多いと考えられている。しかし実際には、正放電においても、帯電部（放電極）の形状によってオゾン発生量はさまざまな傾向を示すことが実験により明らかになった。本稿では、放電極形状とオゾン発生量の定性的な傾向を把握し、オゾン発生量を極小化した電気集塵機について説明する。

第3図に放電極形状および放電極性の違いによるオゾン発生量の比較を示す。Shape 1とShape 2の放電極形状は、第1表に示すようにトゲピッチのみが異なるが、正放電時のオゾン発生量は大きく異なり、Shape 1では負放電よりも増加することが判明した。さらに、Shape 2の結果から、正放電の場合、放電極の形状によってはArea 2に示すようなオゾン発生量に極小値が存在するという特徴的な傾向を示すことを見いだした。

極小値が発生する原因を把握するため、Shape 2の放電極形状におけるコロナ放電の様子と電流波形を確認した。第4図にその結果を示す。コロナ放電開始から消費電力増加とともにオゾン発生量が増加する範囲（Area 1）では、第4図に示すようにコロナ放電はブラシ状に伸びたブラシコロナ放電[3]が発生した。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た。

次に消費電力の増加に対してオゾン発生量が減少する範囲（Area 2）では、ブラシコロナが無くなりトゲ先端

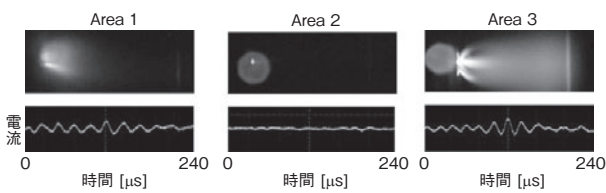


第3図 放電極形状および放電極性の違いによるオゾン発生量の比較  
Fig. 3 Ozone concentration as function of input power for various experimental cases

第1表 放電極形状

Table 1 Shape of discharging pole

	Shape 1	Shape 2
先端角度 (Angle)	20°	20°
高さ (Height)	10 mm	10 mm
ピッチ (Pitch)	4 mm	8 mm
極板間隔 (Gap)	12 mm	12 mm



第4図 正コロナ放電の様子と電流波形の遷移

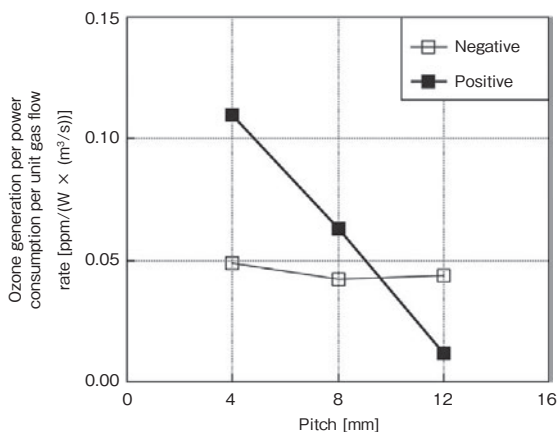
Fig. 4 Corona shape and current ripple

部で球状のグローコロナ放電[2]が発生した。一方電流波形は、Area 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。

さらに、再び消費電力の増加とともにオゾン発生量も増加する範囲 (Area 3) では、接地極板近傍まで延びたストリーマ放電[2]が観測された。電流波形は、再びパルス状の脈動波形となり、振幅はArea 1より大きくなった。

トゲピッチを広げることでトゲ先端部での電界集中が緩和され、電離による電荷の供給と消滅が均衡する印加電圧の範囲が広くなり、グローコロナ放電領域を明確に観測できたと思われる。これより、特定の放電極形状と印加電圧を選択することで、所定のSPM除去に必要な電力を確保しつつオゾン発生量を抑制することが可能となる。

放電極形状の最適化にあたっては、形状を極板間隔 (Gap)、ピッチ (Pitch)、高さ (Height)、先端角度 (Angle) で表現し (第2図参照)、それぞれのパラメータを変化させて単位消費電力・単位風量当たりのオゾン発生量を比較した。第5図に実験結果の一例を示す。第5図は、先端角度30°、高さ10 mm、極板間隔12 mm、印加電圧8 kVの条件下で、ピッチを4 mm～12 mmの間で変化さ



第5図 オゾン発生濃度のトゲピッチ特性

Fig. 5 Ozone concentration as function of spike pitch

せた場合の単位消費電力・単位処理風量当たりのオゾン発生量である。

これより、負放電の場合、ピッチを変えてもオゾン発生量にほとんど差異は見られない。一方、正放電ではピッチが大きくなるほどオゾン発生量が小さくなり、ピッチ12 mmで、正放電が負放電よりもオゾン発生量が小さくなる。

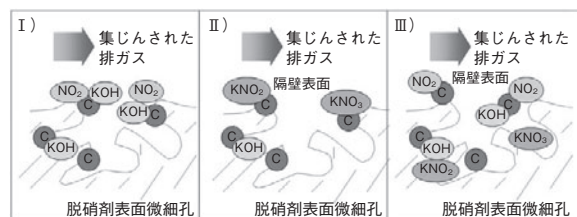
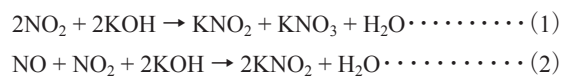
同様の比較をほかのパラメータに対しても行い、最終的に極板間隔12 mm～18 mm、ピッチ8 mm以上、高さ10 mm程度、先端角度20°～40°の放電極形状で電圧を8 kV～12 kV (正極性) 印加することによりオゾン発生量を抑制でき、最大で負放電の1/5に低減できることを見いだした。

従来、道路トンネル用電気集塵機は、他社も含め放電極形状によらず比較的安定した放電特性が得られる負放電を採用してきた。本稿に示す技術により、当社は他社に先駆けてオゾン抑制型の正放電電気集塵機を実用化した。

### 3. 道路トンネル換気用脱硝技術

#### 3.1 脱硝原理と特徴

第6図に、当社のNO<sub>2</sub>除去原理を示す。NO<sub>2</sub>脱硝剤は、活性炭と石膏 (せっこう) を主成分とする原料を練り上げ、ハニカム状に加工後焼成し、これにアルカリ (KOH) を含浸して乾燥させたものである。なお、脱硝装置は電気集塵機の下流側に設置し、排気空気中のSPMはあらかじめ除去しておく。排気空気中のNO<sub>2</sub>は最初に活性炭に吸着され (第6図 I)、吸着されたNO<sub>2</sub>は直ちに脱硝剤に含浸されているKOHと (1) (2) 式に示す反応をし、KNO<sub>2</sub>、KNO<sub>3</sub>の塩となる (第6図 II)。KNO<sub>2</sub>塩、KNO<sub>3</sub>塩は多孔質構造の脱硝剤奥深くまで取り込まれる (第6図 III)。



第6図 NO<sub>2</sub>除去原理

Fig. 6 Principle of NO<sub>2</sub> removal

当社のNO<sub>2</sub>脱硝剤は以下の特徴を有している。

- (1) NO<sub>2</sub>がKNO<sub>2</sub>, KNO<sub>3</sub>の塩として吸収除去されるため、NO<sub>2</sub>除去率を長時間維持できる。(NO<sub>2</sub>濃度0.1 ppm, 1日10時間運転でNO<sub>2</sub>除去率90%以上を約1年間維持可能)
- (2) 常温・常圧で吸収反応するため、設備に加熱・圧縮・濃縮工程が不要である。
- (3) 水洗浄とアルカリ (KOH) 含浸による再生を行うことにより繰り返し使用できる。

ここで紹介した脱硝技術および電気集塵技術は、首都高速道路中央環状新宿線山手トンネル向けの設備に導入している。

## 4. 電気集塵の新方式 (双極コロナ放電)

### 4.1 従来型の課題と対策

道路トンネル用の電気集塵機は定期的に水洗浄して堆積した粉塵を除去し、集塵性能を維持している。このため、洗浄水の貯蔵、洗浄水の供給、洗浄汚水の回収、汚水処理といった補機類が必要である。省エネ・省資源・廃棄物低減の観点から、洗浄周期を延長することが求められている。

従来の電気集塵機は、第2図に示すように帯電部の正コロナ放電により空気中の粉塵を正極性に帯電させるため、帯電した粉塵はほとんどが集塵部の接地極板で捕集される。仮に、第2図の帯電部で負コロナ放電を発生させた場合、粉塵は負極性に帯電し、集塵部の荷電極板に捕集されることになる。いずれにしても、帯電部の放電極性が単一の場合 (本稿では“単極ESP”とする)、集塵部ではいずれかの極板で集中的に捕集することになる。

仮に、粉塵を集塵部の荷電極板、接地極板双方に均一に捕集できれば、集塵性能の低下が抑制でき、洗浄周期の長期化が可能となる。一般には正負の帯電粉塵が混在すると電気的に中和され、集塵性能は低下すると考えられている。しかし、別の実験で正負の帯電粉塵が中和されるには風の流れ方向にある程度の移動距離が必要であることを確認した。

そこで当社では、帯電部において正コロナ放電と負コロナ放電を同時に発生させ、粉塵を正と負の双極に帯電し、集塵部の荷電極板と接地極板の双方で粉塵を捕集するという双極コロナ放電を用いた電気集塵機 (以下、“双極ESP”と記す) の開発に取り組んでいる。

### 4.2 新方式の集塵原理と基本性能

第7図に双極ESPの集塵原理を示す。突起状の放電極

(トゲ、第7図の◎) が風上側にある極板には正電圧を印加する。これにより、風上側トゲ近傍では正コロナ放電が発生し、相対する接地極板風下側に設けたトゲ近傍では負コロナ放電が発生する。集塵部に流入する粉塵のうち、負極性の粉塵は荷電極板に捕集され、正極性の粉塵は接地極板に捕集される。

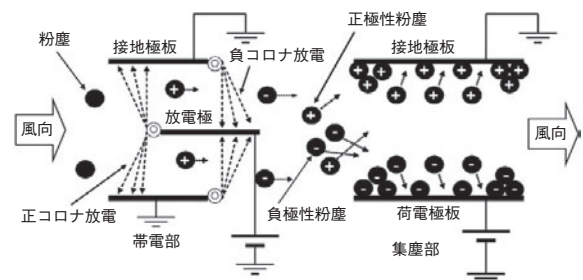
まず双極ESPの基本的性能を確認するため、単極ESPとSPM除去率を比較した。第7図に示す双極ESPの原理モデルに対して、接地極板風下側のトゲを無くした単極ESPを比較対象としSPM除去率を比較した。なお、両者のトゲ形状、極板間隔、消費電力は同じとした。その結果、原理モデルにおいて単極ESPのSPM除去率60%に対し、双極ESPは68%と同等以上あることを確認した。

次に、双極ESPが荷電極板・接地極板双方で均一に粉塵を捕集しているかを確認した。実験は第7図のSPM除去率を測定した原理モデルと同じ放電極形状を用い、双極ESPと単極ESPの諸条件をそろえて16時間連続で並列運転により評価した。

第8図は実験後の双極ESPと単極ESPの集塵部の各極板表面を、光学式顕微鏡 (50倍) で観察した画像を示す。黒色部分が付着粒子である。なお、各画像に付記している数値は黒色面比率 (Black area ratio) を示し、各顕微鏡画像に対し二値画像解析ソフトを用いて算出した。

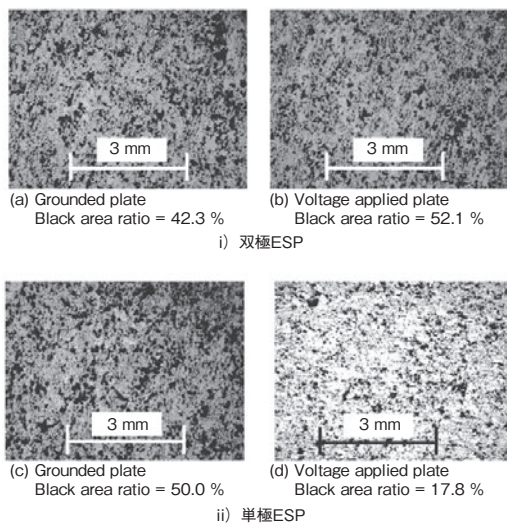
各極板の黒色面比率を比較すると、双極ESPは (a) 接地極板が42.3%、(b) 荷電極板が52.1%と同程度である。一方、単極ESPは (c) 接地極板の50.0%に対し (d) 荷電極板は17.8%と約1/3である。

これらの結果より、原理モデルにおいて双極ESPは単極ESPと同等以上の集塵性能をもち、かつ荷電極板と集塵極板双方均一に粉塵を捕集できることを確認した。よって実機レベルにおいても同様の効果が期待できる。今後は、長時間集塵効率を評価し、さらなる集塵性能向上のための諸条件を探索する。



第7図 双極コロナ放電の集塵原理

Fig. 7 Principle of ESP with bipolar corona discharge



第8図 集塵極板の表面観察  
Fig. 8 Observation on collector plates

## 5. まとめ

本稿では、正放電における放電極形状の最適化により、他社および当社で従来用いられてきた負放電電気集塵機に対して、オゾン発生量を最大で1/5に低減できることを示した。

また、双極ESPという新方式の電気集塵機により、荷電極板と集塵極板双方で均一に粉塵を捕集できることを確認した。

大規模道路トンネルにおける空気浄化の重要性はますます高まるものと考えられる。当社としても、これまでの技術や経験の蓄積を基に、今後も道路トンネル用空気浄化装置の改善に努める所存である。

## 参考文献

- [1] 水野彰, “2007年度第一回静電気学会研究会予稿集,” 静電気学会誌, 2007.
- [2] 新版 静電気ハンドブック, 第1版, 静電気学会, 1998, pp.1137-1139.
- [3] 新版 静電気ハンドブック, 第1版, 静電気学会, 1998, pp.178-179.

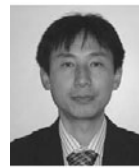
## 執筆者紹介



山口 英告 Hidenori Yamaguchi  
パナソニック 環境エンジニアリング(株) 道路  
環境エンジニアリングビジネスユニット  
Road Environmental Engineering Business Unit,  
Panasonic Environmental Systems & Engineering  
Co., Ltd.



村山 将 Masaru Murayama  
パナソニック エコシステムズ(株) 環境エンジ  
ニアリングビジネスユニット  
Environmental Systems & Engineering Business  
Unit, Panasonic Ecology Systems Co., Ltd.



細野 洋 Hiroshi Hosono  
パナソニック エコシステムズ(株) 環境エンジ  
ニアリングビジネスユニット  
Environmental Systems & Engineering Business  
Unit, Panasonic Ecology Systems Co., Ltd.



村田 光 Hikaru Murata  
パナソニック エコシステムズ(株) 環境エンジ  
ニアリングビジネスユニット  
Environmental Systems & Engineering Business  
Unit, Panasonic Ecology Systems Co., Ltd.



片谷 篤史 Atsushi Katatani  
パナソニック エコシステムズ(株) 環境エンジ  
ニアリングビジネスユニット  
Environmental Systems & Engineering Business  
Unit, Panasonic Ecology Systems Co., Ltd.  
工学博士