

電気集塵装置におけるオゾン・窒素酸化物の抑制技術と  
イオン風の有効利用に関する研究

2010年1月

博士（工学）

片谷 篤史

豊橋技術科学大学

## 要旨

現在、電気集塵装置は産業界に広く普及している。特に、燃焼排ガス中の微粒子除去に適用されるケースが多く、火力発電所の排気浄化、ゴミ焼却場の排気浄化、道路トンネルの排気浄化など、豊富に採用されている。電気集塵装置は、確かに微粒子を除去するが、一方でオゾンの発生により燃焼排ガス中の NO を酸化させ、より有害な NO<sub>2</sub>を増やしていることも事実である。また、電気集塵装置自体から NO<sub>x</sub> が発生するという報告もある。電気集塵装置は、本来、環境改善に役立つべきものであり、前記の負の側面を最小限に留めるための技術探求が重要であると考えられる。

また、電気集塵装置への通風は、通常、機械式回転翼を有するファンにより行われている。電気集塵装置の帯電部の、コロナ放電空間においては、イオン風が発生することが、古くから報告されている。このイオン風を、トゲ付の平行平板構造で発生させ、積極的に通風に利用できれば、電気集塵装置の応用の幅が広がると考える。

そこで、本研究の主テーマを、「電気集塵装置におけるオゾン・窒素酸化物の抑制技術とイオン風の有効利用に関する研究」とした。内容的には、次にあげる3つのサブテーマを、深耕した。

### (1)電気集塵装置からのオゾン発生の抑制技術

帯電部のトゲ放電極の形状(トゲの先端角とトゲ間の間隔)を変化させ、トゲに正または負の直流高電圧を印加する実験を行った。その結果、ある形状のトゲ放電極に正電圧を印加すると、消費電力の増加にも拘わらず、オゾン発生量が減少する領域が存在することを確認した。また、このとき、消費電力の上昇とともに、ブラシコロナ 膜状グローコロナ ストリーマーコロナと放電様態が変化し、膜状グローコロナの様態にあるときに、オゾン減少領域が現れることを確認した。オゾン発生量を最小化できる条件を見出した。

### (2)電気集塵装置からの NO<sub>x</sub> 発生の抑制技術

1段式電気集塵装置において、接地極板に厚さ約 3mm の活性炭繊維(ACF)不織布を貼り付け、荷電極板にはトゲを配置し、正または負の直流高電圧を印加する実験を行った。その結果、負荷電の場合、消費電力が正荷電の半分以下で、正荷電と同一の集塵効率を得た。このとき、負荷電では NO<sub>x</sub> は発生せずにかえって減少し、一方、正荷電では、消費電力の上昇とともに NO<sub>x</sub> 発生量は増加することを確認した。NO<sub>x</sub> 発生量を最小化でき、しかも低消費電力の電気集塵装置を実現する設計条件を見出した。

### (3)トゲ付平板によるイオン風の発生技術

平板にトゲを配置したトゲ電極板(3タイプ)と、接地平板を交互に一定間隔で配列した。トゲ電極板に、正または負の直流高電圧を印加し、各板と平行な一方向に、イオン風を発生させる実験を行った。その結果、イオン風をより強く発生させるための諸条件を見し、イオン風発生装置としての設計条件を明確化することができた。

## Abstract

Electrostatic Precipitators (ESPs) have prevailed over the industries nowadays. ESPs in many cases are especially used for removing fine particles in combustion gas for example thermal power plants, waste incineration plants and car road tunnels. Although ESPs can remove fine particles, ESPs can really generate undesirable ozone which makes NO (nitrogen monoxide) in combustion gas be oxidized into more harmful NO<sub>2</sub> (nitrogen dioxide). There are also the other reports which show that ESPs generate NO<sub>x</sub> (nitrogen oxides). Since ESPs should contribute to improving the environment, it seems important to develop the technology for minimizing the negative aspects above mentioned.

In addition, the ventilation to ESPs is normally made by fans with mechanical rotating blades. It has been reported since old days that ionic wind is generated more or less in the corona discharge space at ionizers of ESPs. If this ionic wind blows in the structure of parallel flat plates with spikes of ESPs and is actively utilized for ventilation, the application of ESPs will become wide.

According to this background the theme of this paper is determined as “Reduction of Ozone and NO<sub>x</sub> Generation from Electrostatic Precipitators and Effective Generation of Ionic Wind”. The following three subthemes will be cultivated technically in this paper.

### (1) Reduction of Ozone Generation in an Electrostatic Precipitator

The various shapes of spike type dischargers in an ionizer of an ESP were examined with the change of the tip angle and tip pitch of spikes. Positive or negative d.c. high voltage was applied to the spikes. As a result, a phenomenon was observed that a type of spikes with positive voltage showed the decrease of ozone generation in spite of increasing the power consumption. At the same time, the aspect was seen that the positive corona discharge modes started from the beginning of brush corona finally to streamer corona via glow corona with increasing power consumption. The region of ozone decrease was appeared only with positive glow corona. The conditions for minimizing the ozone generation from ESPs have been clarified.

### (2) Reduction of NO<sub>x</sub> Generation in an Electrostatic Precipitator

In a one-stage type ESP, non woven cloth of 3 mm thickness made of ACF

(Activated Carbon Fiber) was attached to the surface of the earth-plates. Positive or negative d.c. high voltage was applied to the discharge plates with spikes. As a result, a fact was confirmed that negative discharge was superior to positive discharge on the point of the less power consumption (less than the half) and the decrease of NO<sub>x</sub> generation. In case of positive discharge, the increase of NO<sub>x</sub> with increasing the power consumption was observed. The condition for minimizing the NO<sub>x</sub> generation with low power consumption has been clarified.

### (3) Generation of Ionic Wind by Using Parallel Flat Plates with spikes

Discharge plates (three types) with spikes and earth-plates were alternately arranged with the parallel constant distance. Positive or negative d.c. high voltage was applied to the discharge plates in order to obtain the stronger ionic wind for a direction to be parallel with plates. As a result, the conditions for realizing ionic wind generators as ventilation use have been clarified.

# 目次

1章 はじめに	1
1.1 青年期の経歴	1
1.2 壮年熟年期の経歴	2
1.2.1 トンネル用電気集塵装置の高処理風速化	2
1.2.2 トンネル壁面の黒色化抑制対策	3
1.2.3 トンネル掘削工事用電気集塵装置	4
1.2.4 トンネル排気からの窒素酸化物の除去(脱硝)	6
2章 背景	9
2.1 渋滞する自動車道路の汚染空気	9
2.2 自然通風式電気集塵装置のフィールド実験とその結果	10
2.3 フィールド実験を踏まえた新たな研究テーマ	14
3章 電気集塵装置からのオゾン発生の抑制技術	16
3.1 序論	16
3.2 実験手順	19
3.3 結果と考察	21
3.4 結論	26
3章の参考文献	27
4章 電気集塵装置からのNO <sub>x</sub> 発生の抑制技術	28
4.1 序論	28
4.2 実験手順	29
4.3 結果と考察	31
4.4 追加実験と考察	36
4.5 結論	39
4章の参考文献	40
5章 トゲ付平板によるイオン風の発生技術	42
5.1 序論	42
5.2 実験手順	42
5.3 結果と考察	44
5.3.1 ケース1(図5.2のタイプ1と接地平板)	44
5.3.2 ケース2(図5.2のタイプ2と接地平板)	48
5.3.3 ケース3(図5.2のタイプ3と接地平板)	50
5.3.4 ケース4(図5.2のタイプ1とタイプ2の併用)	51
5.4 結論	52
5章の参考文献	53
6章 結論	55
6.1 オゾン生成とNO <sub>2</sub> 生成	55
6.2 イオン風速の再評価	56
6.3 今後の展望	57
謝辞	58
研究業績	59

## 1章 はじめに

私は、これまでに、社会人技術者として多くの研究テーマに取り組んできた。今回の博士論文のテーマは、これら研究テーマと全く無縁ではない。私自身の歴史的背景も含めて、以下に紹介させていただく。

### 1.1 青年期の経歴

私は、1976年に慶応義塾大学工学部に入学した。4年生時には、電気科の澤孝一郎先生の研究室に入り、ここで、卒論研究に取り組んだ。当時は弱電主流の風潮が強かったが、私はあえて「他人があまり選択しない重電分野」を選んだ。テーマは「大気中極短ギャップにおける絶縁破壊の遅れ時間」であった。二つの球ギャップ間に、直流高電圧を印加し、絶縁破壊に要する時間を統計学的に処理し明確化することが目的であった。絶縁破壊を何万回も発生させて、破壊の遅れ時間を計測する実験を昼夜行った記憶は、今でも鮮明に残っている。

1980年に慶応義塾大学工学部の電気科を卒業すると同時に、三菱重工業(株)の化学プラント事業本部に入社した。この事業本部内に三菱化学プラントエンジニアリングセンター(通称、MCEC「エムセック」)という、化学プラント設備のエンジニアリング専門部門があり、ここへの配属を希望し、叶えられた。希望した理由は、当時、自動車・家電に並ぶ輸出御三家の一角の候補として、プラントが注目されていたからであった。プラントを通じて、世界に通用する技術者になりたいと、若き日の自分は思い続けていた。MCECにおいては、排煙脱硫装置設計課に、電気制御技術者として配属された。

当時は、日本の高度成長時代の末期にあたり、増大する国内の電力需要に対応するため、各電力会社は、各地に石炭火力発電所を新設或いは増設していた。排煙脱硫装置(図 1.1 参照)とは、この石炭火力発電所におけるボイラー燃焼排ガスから、硫黄分を99%以上除去する装置を指す。三菱の排煙脱硫のプロセスは「石灰・石膏法」といって、排ガス中に、石灰液ミストを大量に散布し、排ガス中の二酸化硫黄と化学反応させ、工業用の高品位石膏を得るものであった。火力発電所の建設がラッシュする時代であり、入社数年後には、排煙脱硫プラントの電気制御技術者として自立していた。当時の私の業務内容としては、プラントの動力系統の高圧から低圧に至る受配電設計とセンサー・演算器・コントローラー・調節弁等を用いたプロセス制御設計であった。また、建設現場にも長く駐在し、プラント立ち上げのための現地試験も行った。事務所での設計と現場への駐在が交互するような日々を送った。



図 1.1 排煙脱硫装置

## 1.2 壮年熟年期の経歴

1990年に転職し、パナソニックエコシステムズ(株)(当時の社名は「松下精工(株)」)に入社した。当時、パナソニックエコシステムズは、自動車道路トンネルの空気浄化装置の開発設計に対応できる人材を求めていた。自身の前歴を買われ、即戦力技術者として、道路技術部に採用・配属された。(そして、現在に至っている。)道路技術部においては、種々の研究開発を行ったが、以下に代表的テーマを紹介する。

### 1.2.1 トンネル用電気集塵装置の高処理風速化

トンネル用の電気集塵装置は、細長く狭隘なトンネル風路断面に設置されるので、十分なコンパクト性が求められた。当初の処理風速は7m/sであったが、9m/s、11m/sと風速を上げ、最終的には13m/sの処理風速で集塵効率80%を達成することに成功した。竣工一年後でも集塵性能は維持されている。(表1.2.1参照)

表 1.2.1 竣工一年後の電気集塵機の現地性能測定結果

処理風速 13m/s	SPM (計数法) 柴田科学製 AP632-T			SPM (重量法、10μmカット) 東京ダイレック製 MODEL2000			SPM (計数法) 柴田科学製 AP632-T			SPM (重量法、10μmカット) 東京ダイレック製 MODEL2000			
	入口 濃度	出口 濃度	除去率	入口 濃度	出口 濃度	除去率	入口 濃度	出口 濃度	除去率	入口 濃度	出口 濃度	除去率	
	mg/m3	mg/m3	%	mg/m3	mg/m3	%	mg/m3	mg/m3	%	mg/m3	mg/m3	%	
時	mg/m3			mg/m3			mg/m3			mg/m3			
9:00	0.144	0.019	86.8	0.088	0.014	84.1	22:00	0.087	0.011	87.4	0.056	0.010	82.1
10:00	0.182	0.022	87.9				23:00	0.116	0.016	86.2			
11:00	0.187	0.022	88.2				0:00	0.102	0.014	86.3			
12:00	0.185	0.022	88.1				1:00	0.121	0.016	86.8			
13:00	0.184	0.025	86.4				2:00	0.146	0.019	87.0			
14:00	0.200	0.027	86.5				3:00	0.143	0.019	86.7			
15:00	0.235	0.030	87.2				4:00	0.171	0.027	84.2			
16:00	0.294	0.041	86.1				5:00	0.187	0.030	84.0			
17:00	0.175	0.022	87.4				6:00	0.216	0.033	84.7			
18:00	0.157	0.022	86.0				7:00	0.157	0.025	84.1			
19:00	0.105	0.014	86.7				8:00	0.146	0.022	84.9			
20:00	0.110	0.014	87.3				9:00	0.087	0.014	83.9			
21:00	0.082	0.011	86.6										

開発のポイントは帯電能力のアップと圧力損失上昇の抑制であった。この高処理風速の電気集塵装置は、首都高速道路株式会社のトンネルで広く使用されている。(図 1.2.1(a)、図 1.2.1(b)参照)



図 1.2.1(a) バイパス集塵システム

図 1.2.1(b)トンネル用電気集塵装置

### 1.2.2 トンネル壁面の黒色化抑制対策

長大な山岳トンネルでは、トンネル中間地点付近に設置した電気集塵装置により、集塵ろ過した空気を、再度トンネル内に供給し、走行車両の運転手に安全な視程を確保をしている。ここで集塵装置の後流側の SPM (浮遊粒子状物質) 濃度は低減されるが、電気集塵装置で捕集しきれなかった SPM が問題となった。捕集しきれなかった SPM は電気集塵装置の帯電部により荷電粒子となっており、この電荷を帯びた SPM がトンネル内壁面に付着し、黒色化をもたらし、車両通行者の視環境を悪化させるという課題が発生した。バイパス集塵 (図 1.2.1(a)参照) の後流側の数百 m にわたって、トンネルの内壁面が黒色化したので、トンネル現地で実験を行い、解決の可能性を検証することにした。

現地実験は大掛かりなものであった。既設のトンネルには、すべて正放電の電気集塵装置が複数台配置されていた。これらの約半数を負放電に改造し、正電荷と負電荷を中和するという対策を試みた。バイパス集塵の後方、数百 m の各ポイントの壁面に、100 m 間隔で暴露試験片 (タイル、ホーロー、スレート) を取り付け、汚れ具合の評価を、反射率計 (ミノルタ製: CR-300) を用いて行なった。中和対策の結果、壁面汚れは、綺麗に解消した。この正放電と負放電の電気集塵装置の併用方式は、日本道路株式会社 (当時の日本道路公団) の共通仕様書に盛り込まれる運びとなった。



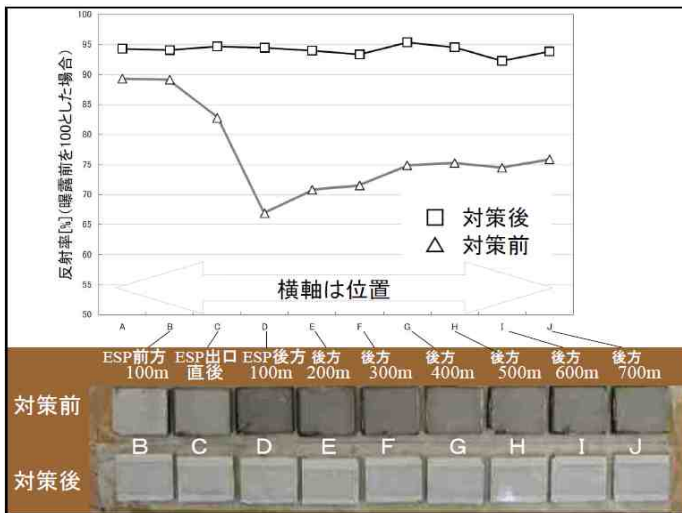


図 1.2.2 実トンネルにおける電気集塵装置後方の壁面汚れ対策の効果

### 1.2.3 トンネル掘削工事用電気集塵装置

トンネルの掘削現場では最深部（以下「切羽」キリハ）で多量の粉塵（岩粉、コンクリート粉）が発生する。掘削作業が安全かつ衛生的な環境で行われるために、ファンにより外部の新鮮空気を切羽に向けて送気している。切羽に送られた新鮮空気は切羽で発生する多量の粉塵と混ざり合い汚染空気となる。トンネルの途中の地点でも各種作業を行っており、ここでの環境を悪化させないことが、安全・衛生上重要である。従って4トン車（トラック）に搭載でき移動可能な電気集塵装置で切羽から押し寄せてくる汚染空気を浄化する必要性が生じた。この車両に積載する電気集塵装置には、小型、低電力、省保守が要求された。

この電気集塵技術を、現場の粉塵除去に適用するためには、掘削現場という未知の粉塵の性状を正しく把握する必要がある。そこで、まず現場で、調査・分析・試験を行うことにより、次の不明事項を明確にした。

集塵効率に影響を与える現場の諸条件を実測した。粉塵濃度はローボリュームサンプラー（東京ダイレック MODEL2000）とデジタル粉塵計（柴田科学 AP632-T）を用いて計測し、 $3 \sim 30 \text{mg/m}^3$ であった。また、粉塵の比抵抗は  $1\text{E}05 \sim 5\text{E}07 \cdot \text{cm}$  であり、「電気集塵は可能である」と判断した。

試験用の小型電気集塵装置を現場に持ち込み集塵し、極板に捕集した粉塵を、水洗浄で洗い流せることを確認した。排水の水質分析を行い、周辺への環境に悪影響を与えないことを確認した。

電気集塵装置の宿命的現象であるスパークが、発破の火薬に対し「誤爆」を誘発しないか検討し、安全性を確認した。

上記を踏まえ設計製作した初号機は図 1.2.3(a)(b)(c)の通り。トンネル掘削工事現場という過酷な環境で使用可能な電気集塵装置を開発することに成功した。厚生労働省傘下の建設業労働災害防止協会が発行する「ずい道等建設工事における換気技術指針」の中に、開発した電気集塵装置がスペックインされた。

品番	FY-20TKE
形式	二段式電気集塵
処理風量	2000 m <sup>3</sup> /min
集塵効率	90 %
全幅 W	2285 mm
全長 L	6000 mm
全高 H	3354 mm
質量	約 6000 kg
電源容量 (50Hz / 60Hz)	3相3線 400V系 49 / 50 kVA
消費電力 (50Hz / 60Hz)	40.8 / 41.9 kW
使用送風機	軸流送風機(固定ピッチ)
洗浄	洗浄頻度: 1日1回以上 必要水量: 約 2.4m <sup>3</sup> /回 供給圧力: 0.5~0.9MPa
付属機器	サイレンサー



図 1.2.3(a) 掘削工用電気集塵装置



図 1.2.3(b) 掘削工用電気集塵装置の効果 (その 1)

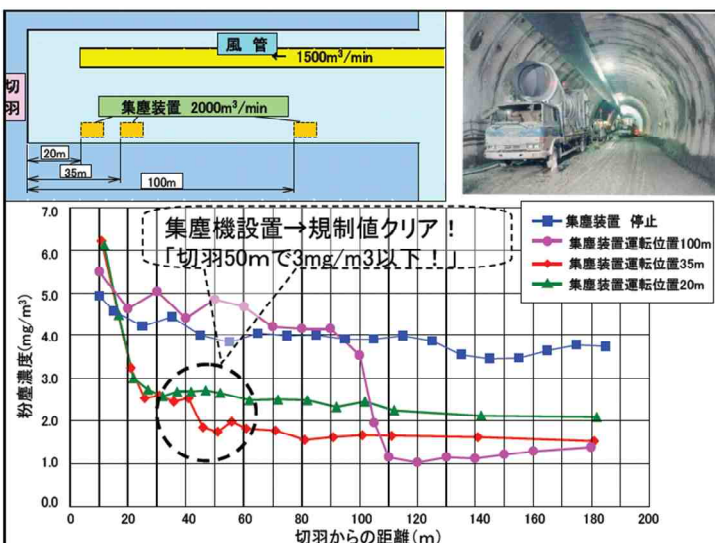


図 1.2.3(c) 掘削工用電気集塵装置の効果 (その 2)

### 1.2.4 トンネル排気からの窒素酸化物の除去（脱硝）

1990年代初頭、国交省（当時建設省）は、トンネル排気からNO<sub>x</sub>（窒素酸化物）を除去する技術を民間に求めた。国交省からの要求仕様は、NO<sub>x</sub>を80%除去（注記1参照）するものであった。

（注記1；当時の国交省からの要求の背景には、トンネル排気から、窒素酸化物と硫黄酸化物を積極的に除去し、光化学スモッグおよび酸性雨の主要因を少しでも取除きたいという思いがあった。）

パナソニックは、電気集塵装置とオゾナイザと八ニカム型酸性ガス吸収剤（注記2参照）を組み合わせた脱硝装置を提案し、国交省の検討のテーブルに乗ることができた。1992年から1年間、国交省の監督下で、脱硝装置の性能を把握するためのフィールド実験を行った。実験場所は首都高速の大井換気所の敷地内であった。実験の結果、NO<sub>x</sub>を安定して80%以上除去することを実証した。（図1.2.4(a)参照）また、この実験の詳細については、National Technical Reportの1995年6月号330-338ページに掲載された。

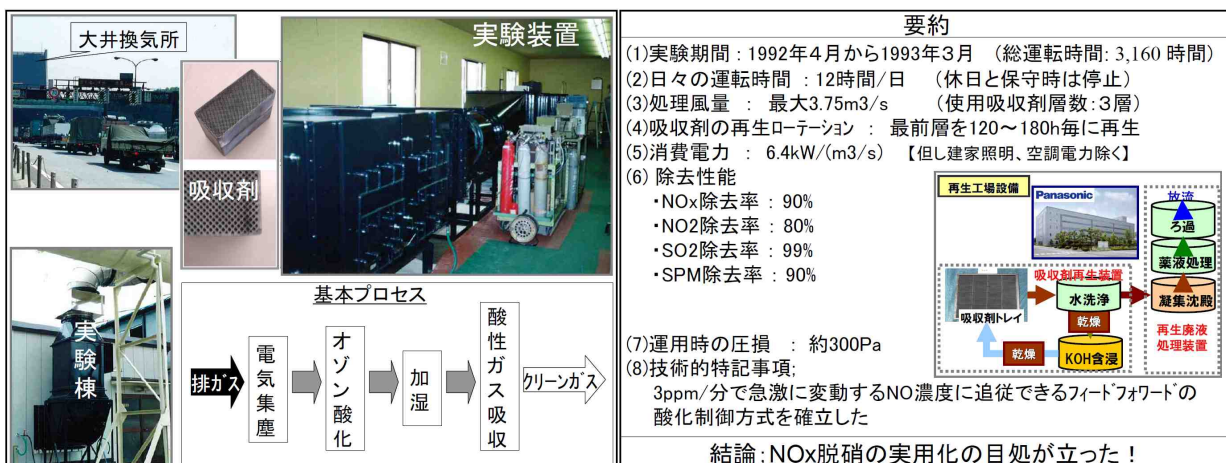


図 1.2.4(a) NO<sub>x</sub> 脱硝装置のフィールド実験

（注記2；この酸性ガス吸収剤は、活性炭と石膏などの原料を混練し、八ニカム型に成型し、焼き固めた後に、アルカリである水酸化カリウム液を含浸するものである。トンネル排気ガス中の酸性ガスであるNO<sub>2</sub>（二酸化窒素）は、吸収剤中の活性炭に吸着されると、直ちにアルカリと反応し中和塩になる。NO<sub>2</sub>の再放出を防ぎつつ、吸収剤内部に中和塩を蓄える機能をもっている。また、この吸収剤は、使用後、水洗・乾燥の後にアルカリを含浸すれば、再使用（再生）が可能であるという特徴を持っている。）

その後、国交省は、NO<sub>x</sub>中のNO<sub>2</sub>のみを90%除去するという内容の要求仕様の方針転換した。（注記3参照）

(注記3 ; この方針転換の背景には、1997年当時、トンネル排気からNO<sub>x</sub>を除去する技術が、国内各社でほぼ出揃い完成していた。しかしながら、このNO<sub>x</sub>除去装置の建設費と維持管理費用が莫大になることも明らかとなっていた。そこで当時、国交省の低濃度脱硝委員会(委員会)は、あるシミュレーションを行った。その結果、委員会は、「トンネル排気からNO<sub>x</sub>を80%除去した場合のトンネル換気所の敷地境界でのNO<sub>2</sub>濃度と、NO<sub>2</sub>を90%除去した場合の敷地境界でのNO<sub>2</sub>濃度とは同レベルである」という解を得た。そして、NO<sub>2</sub>除去に重点特化した方が、脱硝装置の建設費を半分以下に、維持管理費を数分の一以下にできるという見通しを立てた。この見通しの根底には、概ね、次のような考え方があったものとされている。「トンネル排気の脱硝開発については、当初、大都市圏全体の広範囲の大気を少しでも改善しようと高邁な考え方を抱き、これに基づきNO<sub>x</sub>脱硝方式としてスタートした。しかし、フィールド実験と検討を重ねるうちに、これには非現実的な多大なトンネル建設費を要することが、明らかになった。大都市圏ではトンネル以外の開放空間に、より多くの車両が走行しており、トンネルの排気浄化のみに多大なコストを投資することが、必ずしも得策ではない。ただし、トンネルの排気口周辺の近隣住民に対しては、NOよりも遥かに有害性の高いNO<sub>2</sub>に絞って重点的に除去するという局地的な対策が重要になるであろう。」)

2000年に国交省は、NO<sub>x</sub>中のNO<sub>2</sub>のみを90%除去するというNO<sub>2</sub>重点除去型脱硝装置(NO<sub>2</sub>脱硝装置)の入札を公告した。パナソニックはこれを落札し、2001年度に装置の製作・設置工事を行った。設置場所は、首都高湾岸線空港北トンネルの京浜島換気所敷地内であった。

2002年から約2年間、パナソニックは、国交省の監督下で、脱硝装置の性能を把握するためのフィールド実験を行い、NO<sub>2</sub>を安定して90%以上除去することを実証した。(図1.2.4(b)(c)参照。)

国交省は、吸収剤を用いたNO<sub>2</sub>脱硝装置を、トンネルの排気浄化に使用可能であることを認定した。その結果、2004年に、首都高新宿線の山手トンネルに、処理風量1670m<sup>3</sup>/sの吸収剤方式NO<sub>2</sub>脱硝装置が設置される運びとなった。以降、現在も稼働中である。NO<sub>2</sub>脱硝装置については、新宿線以外でも、首都圏および阪神圏で、今後いくつかの大型プロジェクトが計画されている。

また、新宿線のNO<sub>2</sub>脱硝装置については、海外の道路管理者などが、多数見学に訪れている。官民が協力して築きあげた、日本のトンネル脱硝技術が、世界に認められ、海外に羽ばたくことに期待したい。



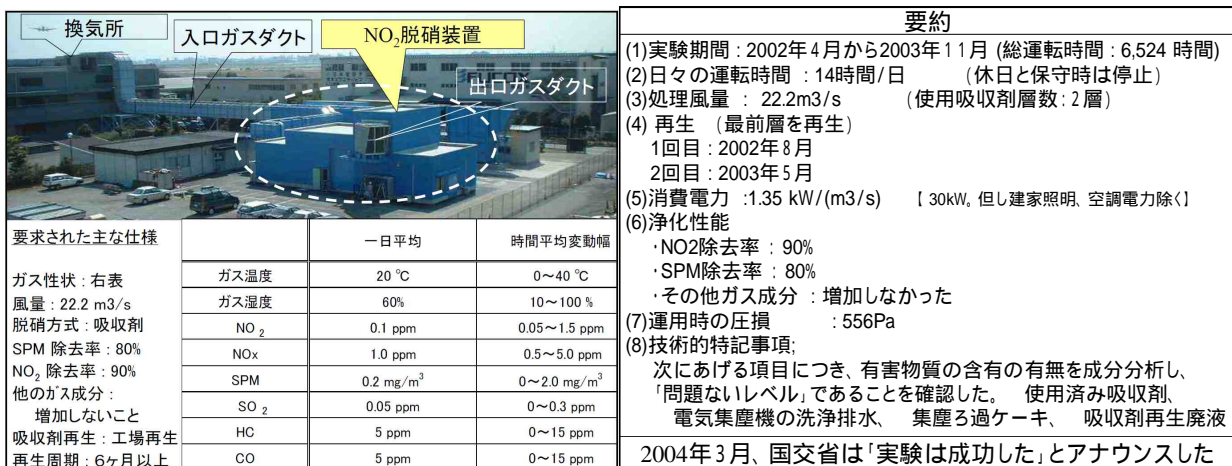


図 1.2.4(b) NO<sub>2</sub> 脱硝装置のフィールド実験

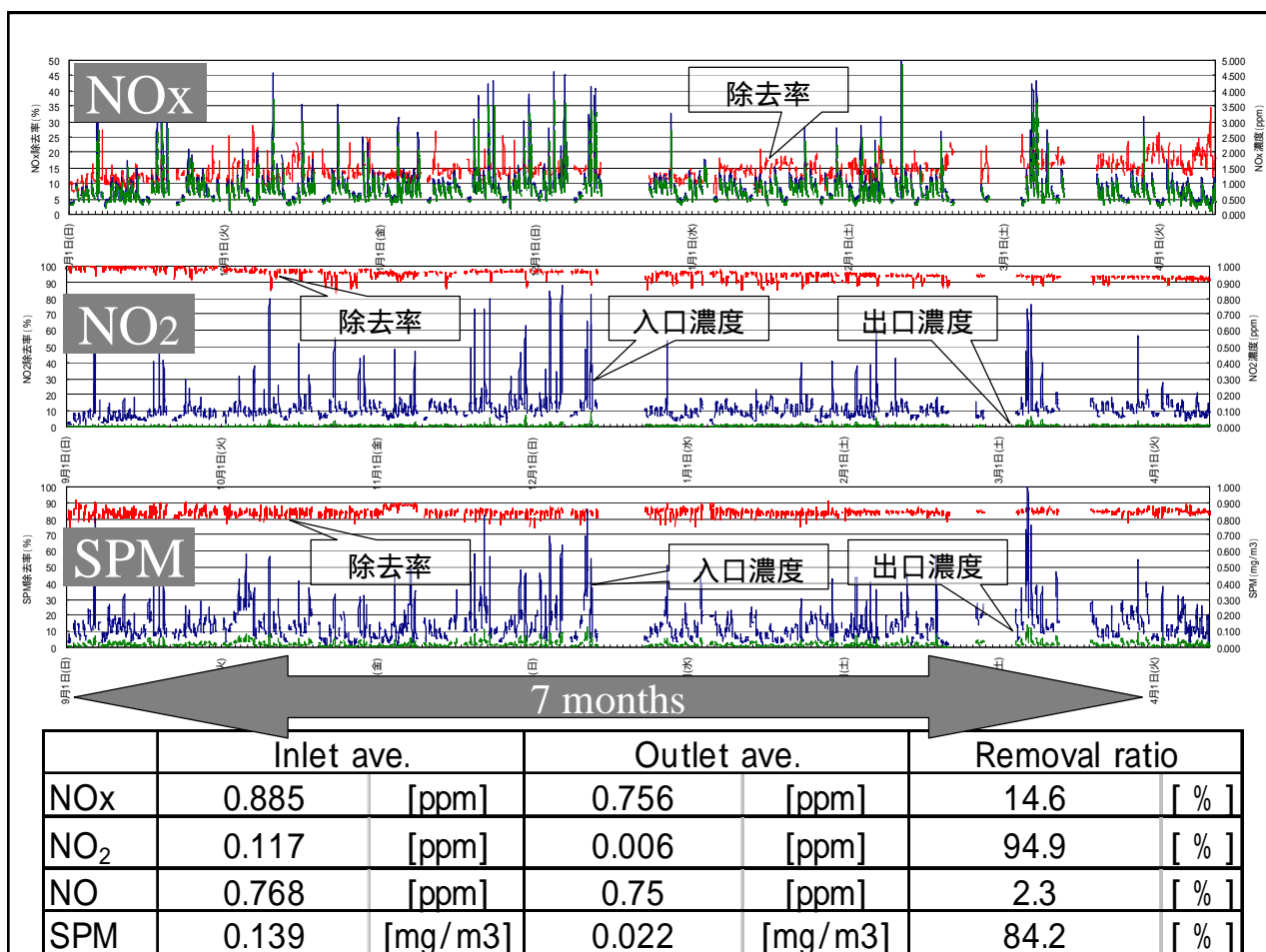


図 1.2.4(c) NO<sub>2</sub> 脱硝装置のフィールドでの除去性能抜粋 ( 注記 4 )

(注記4： 化学発光式 NO<sub>x</sub> 分析計：堀場製作所 APNA-370。 計数法式 SPM 分析計：柴田科学製 AP632-T、質量濃度換算係数は 0.0031(mg/m<sup>3</sup>)/cpm )

## 2章 背景

主要な研究内容は、前章の通りではあるが、もうひとつ大きなテーマがあった。それは、「沿道の大気浄化」というもので、今回の卒業論文のテーマ決定に深く関わるものである。

### 2.1 渋滞する自動車道路の汚染空気

2001年10月9日の毎日新聞(夕刊)の記事を以下に示す。2000年前後は、道路公害訴訟裁判が活発に行われ、図2.1.1のような沿道汚染状況のワースト記録が、各新聞に頻繁に掲載されていた。

<p>◇二酸化窒素濃度のワースト5◇ (環境基準は0.06ppm以下、単位はppm)</p> <table border="1"> <tr><th>順位</th><th>測定局</th><th>日平均値</th></tr> <tr><td>1</td><td>(1)中山道大和(東京都板橋区)</td><td>0.086</td></tr> <tr><td>2</td><td>(3)松原橋(東京都大田区)</td><td>0.085</td></tr> <tr><td>3</td><td>(一)遠藤町交差点(川崎市)</td><td>0.081</td></tr> <tr><td>4</td><td>(一)梅島(東京都足立区)</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>5</td><td>(3)池上新田公園前(川崎市)</td><td>0.079</td></tr> <tr><td>5</td><td>(2)今里交差点(大阪市)</td><td>0.079</td></tr> </table> <p>◇浮遊粒子状物質濃度のワースト5◇ (環境基準は1立方メートル0.1mg以下、単位はmg/m<sup>3</sup>)</p> <table border="1"> <tr><th>順位</th><th>測定局</th><th>日平均値</th></tr> <tr><td>1</td><td>(1)松原橋(東京都大田区)</td><td>0.161</td></tr> <tr><td>2</td><td>(2)中山道大和(東京都板橋区)</td><td>0.140</td></tr> <tr><td>3</td><td>(一)遠藤町交差点(川崎市)</td><td>0.130</td></tr> <tr><td>4</td><td>(4)環7通り亀有(東京都豊飾区)</td><td>0.128</td></tr> <tr><td>5</td><td>(5)池上新田公園前(川崎市)</td><td>0.125</td></tr> </table> <p>*カッコ内は前年度順位。</p>	順位	測定局	日平均値	1	(1)中山道大和(東京都板橋区)	0.086	2	(3)松原橋(東京都大田区)	0.085	3	(一)遠藤町交差点(川崎市)	0.081	4	(一)梅島(東京都足立区)	0.080	5	(3)池上新田公園前(川崎市)	0.079	5	(2)今里交差点(大阪市)	0.079	順位	測定局	日平均値	1	(1)松原橋(東京都大田区)	0.161	2	(2)中山道大和(東京都板橋区)	0.140	3	(一)遠藤町交差点(川崎市)	0.130	4	(4)環7通り亀有(東京都豊飾区)	0.128	5	(5)池上新田公園前(川崎市)	0.125	<p style="text-align: center;"><b>NO<sub>2</sub>は改善続く</b></p> <p>環境省は9日、2000年度の大気汚染状況調査を発表した。自動車排ガスなどに含まれる浮遊粒子状物質が悪化</p> <p>原因となる二酸化窒素は2年連続で改善傾向を示したが、浮遊粒子状物質は悪化</p>	<p>遊離粒子状物質(SPM)はやや悪化した。調査は、住宅街などの測定点(1703カ所)と、幹線道路沿いの測定点(416カ所)の計2119カ所で実施した。このうち大気汚染が激しく、自動車排ガスが原因のNO<sub>x</sub>は、法で特定地域に指定された首都圏(近畿圏)埼玉千葉、東京神奈川、大阪、兵庫の幹線道路沿いの測定点(172カ所)でNO<sub>x</sub>の環境基準(0.06ppm以下)を達成したのは2カ所、ppmは100万分の1を達成したのは62カ所、98年度(99・8)より増えた。一方、SPM測定点(148カ所)で環境基準(1立方メートル0.15mg以下)を達成した地域は52カ所、98年度(99・8)より減少した。NO<sub>x</sub>、SPMの環境基準達成率は98年度から99年度にかけてかなり改善され、その改善が部分的なものかという点については、00年度99年度と同様水準で推移したことについて同省は「理由不明」とし、原因不明の検討会設置を決めた。二酸化窒素は環境基準の達成率が94.2%より減少。同省は、三毛塵の噴火で、火山ガスが関東から東海地方にかけて広がったことが原因とみている。【高野悠】</p>
順位	測定局	日平均値																																							
1	(1)中山道大和(東京都板橋区)	0.086																																							
2	(3)松原橋(東京都大田区)	0.085																																							
3	(一)遠藤町交差点(川崎市)	0.081																																							
4	(一)梅島(東京都足立区)	0.080																																							
5	(3)池上新田公園前(川崎市)	0.079																																							
5	(2)今里交差点(大阪市)	0.079																																							
順位	測定局	日平均値																																							
1	(1)松原橋(東京都大田区)	0.161																																							
2	(2)中山道大和(東京都板橋区)	0.140																																							
3	(一)遠藤町交差点(川崎市)	0.130																																							
4	(4)環7通り亀有(東京都豊飾区)	0.128																																							
5	(5)池上新田公園前(川崎市)	0.125																																							

図 2.1.1 沿道の大気汚染を報告する新聞記事

環境省の外郭団体である独立行政法人 環境再生保全機構は、2001年から自動車道路周辺の局地的な大気汚染の改善技術を探求していた。環境再生保全機構の当時の目的の要旨を、原文に近いかたちで以下に示す。

「大都市域の交差点や幹線道路沿道における浮遊粒子状物質(SPM)および窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)による大気汚染は依然深刻な状況にあり、健康影響が懸念され対策が急務となっている。これら汚染物質への対策は、広域的な観点で行われる自動車交通対策及び自動車単体からの排出制御が基本と考えられるが、局地的で高濃度な大気汚染状況を早急に改善するためには、これらに加え、各地域の局地汚染に対応した沿道排ガス浄化装置による排ガス浄化対策の導入の検討が必要である。大都市の交差点や幹線道路沿道において、浮遊粒子状物質および窒素酸化物を複合的に除去するための沿道排ガス浄化技術の検討を行うことを目的とする。」

2002年に、道路技術部は、環境再生保全機構からの委託を受け、沿道排ガス浄化技術の研究を開始し、2007年まで継続した。

## 2.2 自然通風式電気集塵装置のフィールド実験とその結果

環境再生保全機構からの委託研究において、工場側(ラボ)で自然通風式電気集塵装置の要素実験と開発・設計・評価を行った。ここで、自然通風式とは、車輛の走行風や自然風を利用して装置内に通風するもので、ファンによる強制通風を行わない方式を指す。その後、フィールドに持ち込み、現場での性能評価を行った。フィールド実験場所は、川崎市の産業道路における中央分離帯(川崎市川崎区池上町1番地先)であった。自然通風式電気集塵装置の基本構造を図2.2.1に示す。またフィールド実験装置の外観を図2.2.2に、中央分離帯でのSPM濃度の一例を図2.2.3に示す。

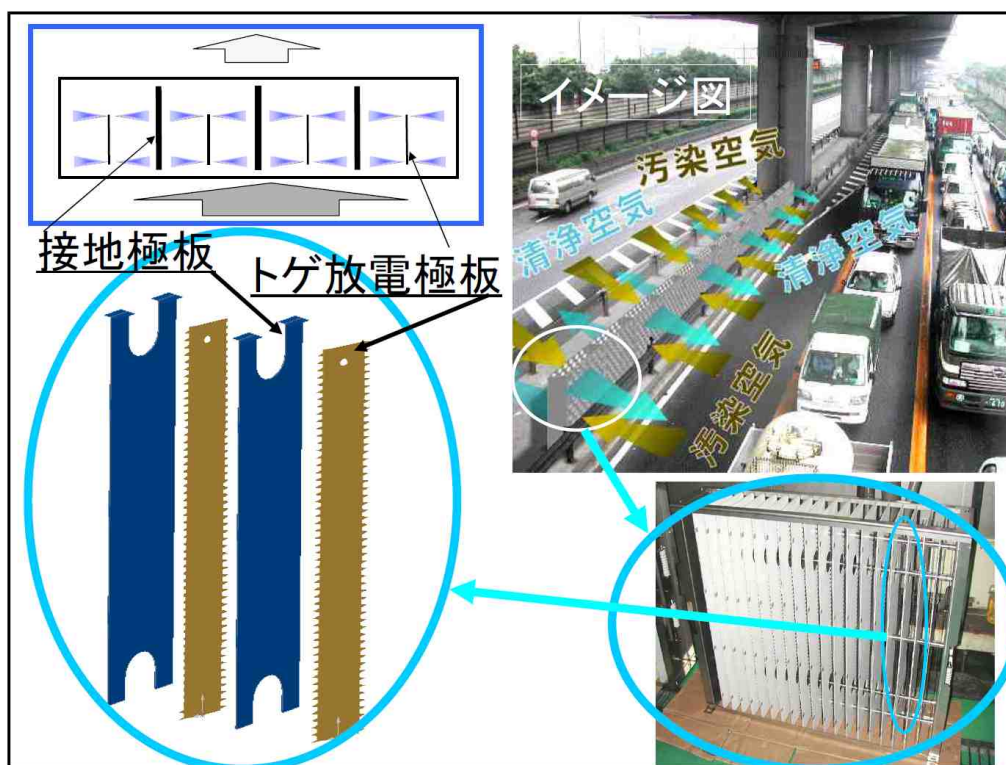


図 2.2.1 自然通風式電気集塵装置の基本構造

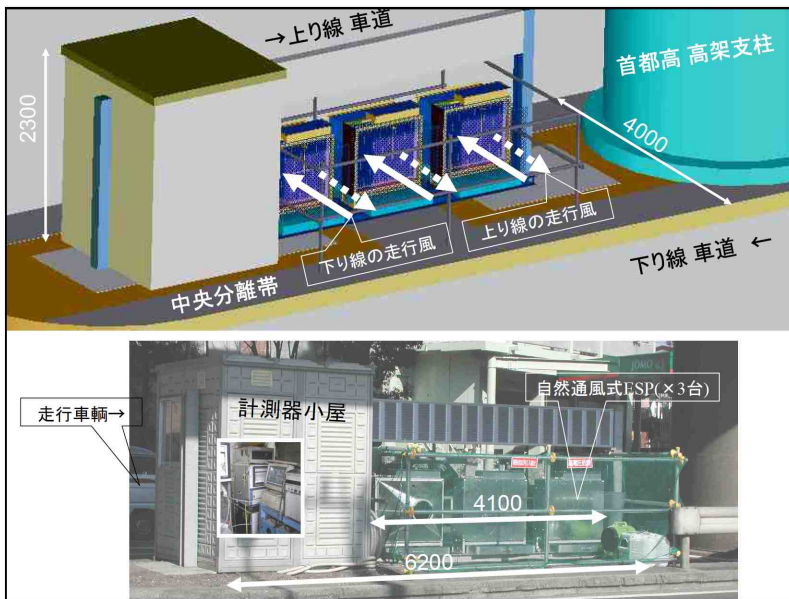


図 2.2.2 フィールド実験装置の外観

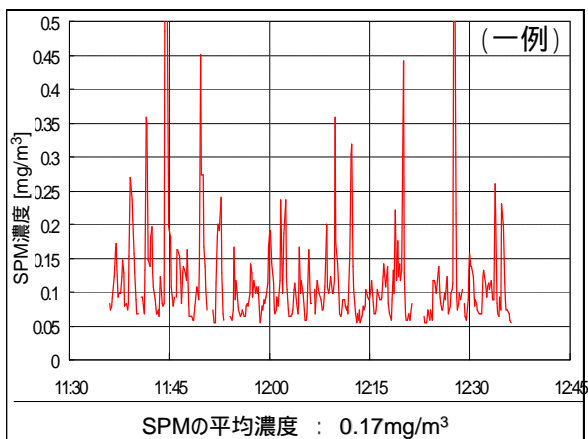


図 2.2.3 中央分離帯での SPM 濃度の実測例

フィールド実験を数度にわたって実施し、都度改良を行った。一連の実験の成果をまとめると、次のような内容であった。

#### (工場ラボ実験)

風速約 1m/s の条件において、SPM 除去率が 80%であることを確認した。(ローボリュームサンプラー：東京ダイレック MODEL2000、およびデジタル粉塵計：柴田科学 AP632-T による。)

装置に活性炭繊維 (ACF) を付加することによって、装置入口側よりも出口側 NO<sub>2</sub> 濃度が増加しないことを確認した。

装置から発生する磁界強度 (スパークノイズ) は、携帯電話のノイズレベル以下であった。スパークノイズは、走行車輛・人体・電子機器に影響を与えないレベルであることを確認した。(表 2.2.1 参照)



装置の安全性向上対策として、ルーバータイプの保護網、保護網取外し時の高電圧停止インターロック及び連続スパーク抑制回路を設けた。  
雨水利用が可能な構造とした。

表 2.2.1 電気集塵装置から発生する磁界強度評価

測定器	交流磁界強度計：MTI製 3軸磁界測定器 HM315		
	直流磁界強度計：MTI製 1軸磁界測定器 HM101		
測定対象	スズキ製 軽トラック(測定点:測定対象から1mの位置) 携帯電話 DoCoMo P900i(測定点:測定対象から0.22mの位置) 沿道浄化用 電気集塵装置(測定点:測定対象から1mの位置)		
評価基準	<ul style="list-style-type: none"> <li>・直流磁界 2000[<math>\mu</math>T]以下、交流磁界 20[<math>\mu</math>T]以下 (東京医科歯科大「ベースメーカーの電磁干渉について」より抜粋)</li> <li>・携帯電話から22cm離れた場所のノイズレベルを上回らないこと (日本メトロニック㈱「ベースメーカーって、何ですか？」より抜粋)</li> <li>・自動車から発生するノイズレベルを上回らないこと</li> </ul>		
実験結果			
	最大磁界強度[ $\mu$ T]		備考
	直流	交流	
軽トラック	0.8	0.09	測定点は助手席側、エンジンONの瞬間 アイドリング時は0.3 $\mu$ T(直流)であった。
携帯電話	0.5	0.01	測定点は背面側、着信時
電気集塵装置	0.0	0.00	運転時もスパーク時も「磁界検出されず」

(フィールド実験)

自然通風条件において、周囲風速の約40%の風を浄化装置内に導いていた。  
風速約1m/sの自然通風条件において、SPM除去率80%を確認した。  
[ デジタル粉塵計：柴田科学 LD-3Kによる。SPM濃度の質量濃度換算係数は、  
0.0049(mg/m<sup>3</sup>)/cpm ]

ナノ粒子(粒径0.1 $\mu$ m以下の粒子)に対し、50~80%以上の集じん効率を得られることを確認した。(図2.2.4参照)

装置の循環水中の成分分析結果から、SPMが捕集されていることを確認した。  
排水中の有害物質が基準値以下であることを確認した。(図2.2.5参照)

1ヶ月間、自動運転し、故障発生は無かった。

運用1ヶ月後のSPM除去率は、運用初期と比べて低下していなかった。

運用1ヶ月後の吸着剤のNO<sub>2</sub>除去効果は持続していた。(装置から流出するNO<sub>2</sub>濃度は流入濃度以下であった。)

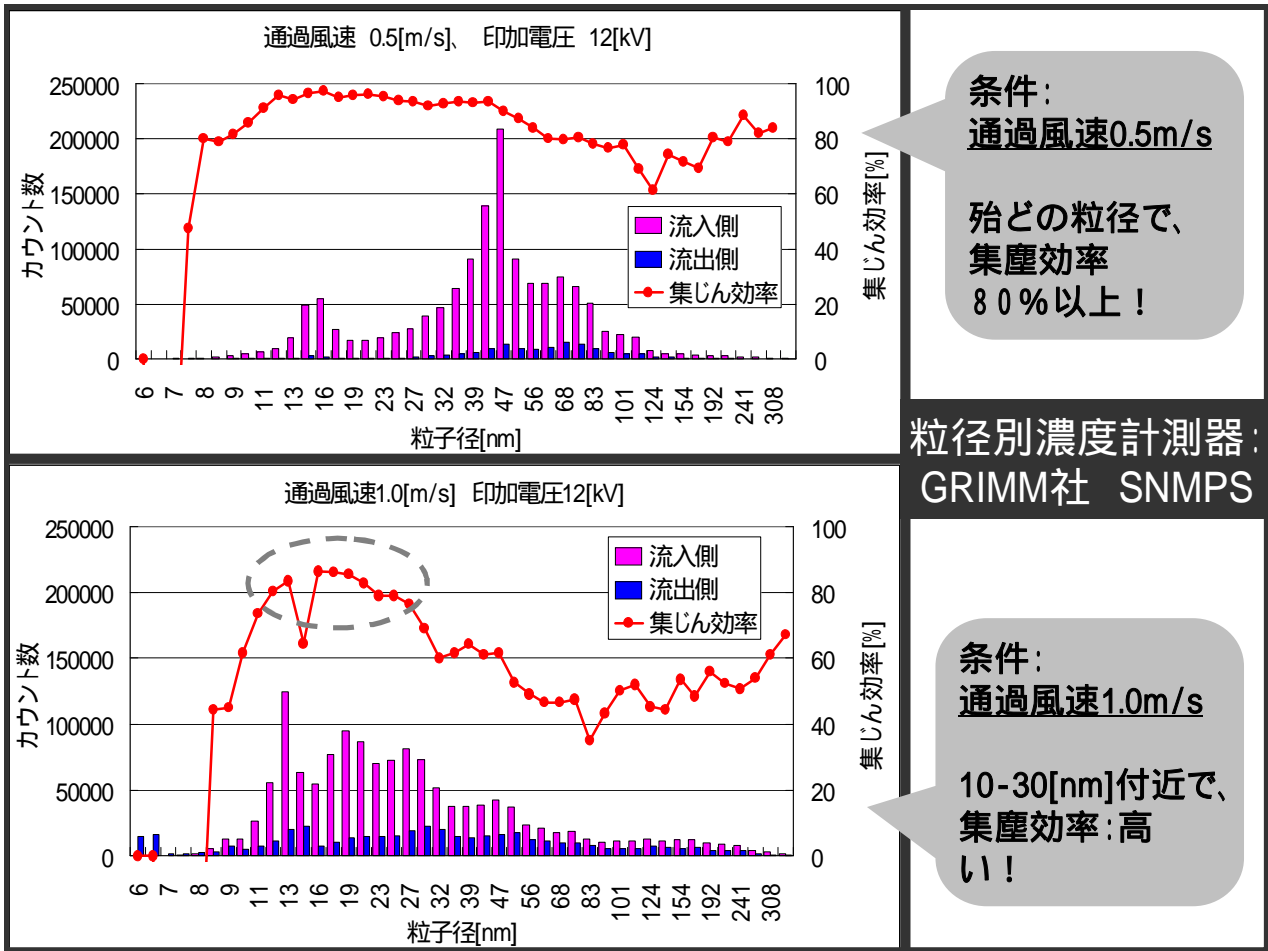


図 2.2.4 フィールドでのナノ粒子の除去性能

条件		
分析水	荷電装置循環水	
電圧印加時間	約10時間/日	
循環量	約20リットル(繰返し循環)	
流量	約5リットル/時	
期間	14日間	
原水	水道水	

分析項目	分析結果	排水基準 [mg/l]	分析項目	分析結果	排水基準 [mg/l]
全水銀	不検出	0.005以下	六価クロム	不検出	0.5 以下
ヒ素	不検出	0.1以下	シアン	不検出	1 以下
有機リン	不検出	0.2以下	鉛	0.02	0.1 以下
アルキル水銀	不検出	検出され ないこと	カドミウム	不検出	0.1 以下
PCB	不検出	0.003以下	川崎市排水基準では「50m3/日未満」		

洗浄排水中の有害物質は排水基準値以下!

図 2.2.5 排水中の有害物質の分析結果

### 2.3 フィールド実験を踏まえた新たな研究テーマ

トンネル用電気集塵装置を開発し、そして自然通風式の電気集塵装置のフィールド実験を行う中で、「電気集塵装置は確かにSPMを除去するが、オゾンが発生によりNO(一酸化窒素)を酸化させ、返ってNO<sub>2</sub>を増やしている側面がある。また、電気集塵装置から、NO<sub>x</sub>が発生するという報告もある。」という点を課題として認識した(注記5参照)。

(注記5; 図2.3.1は、中央分離帯でのNO<sub>x</sub>濃度計測の実例である。このときのNO<sub>2</sub>の平均濃度は90ppbであった。)

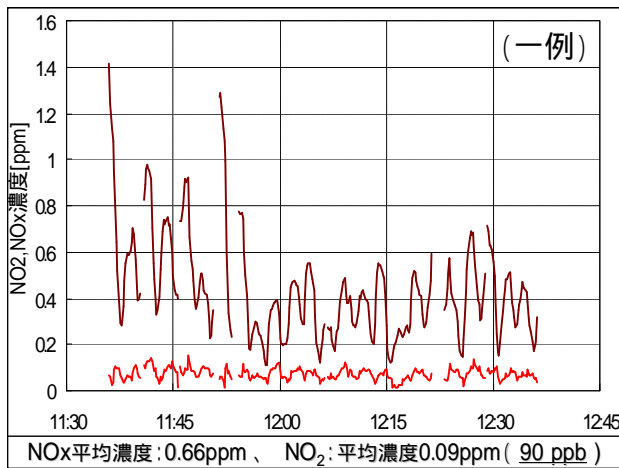


図 2.3.1 沿道における NO<sub>x</sub> 濃度計測の例

また、自然通風式電気集塵装置の開発中に、装置の前面から、弱からぬイオン風が吹いてくることを知り、その風速を熱線風速計で計測した。(図2.3.2参照) その結果、「自然通風式電気集塵装置においては、イオン風を積極的に利用し、通風することが低消費電力の観点から重要になるのではなかろうか」と考えるに至った。

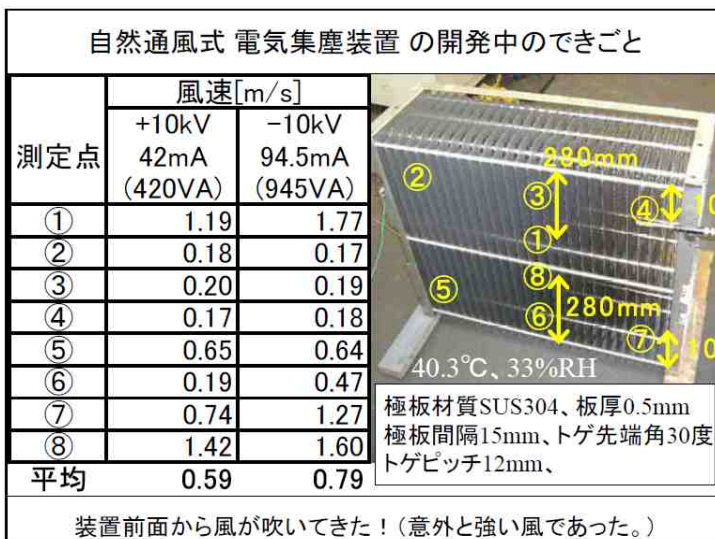


図 2.3.2 電気集塵装置からのイオン風

電気集塵装置は、周辺環境の維持・改善に貢献すべきものであり、単に SPM を除去すればよいというものではない。低消費電力で、高集塵効率を達成し、しかもオゾン・NOx という有害物質の発生が、極力抑制されるものでなければならないと考える。

そこで、今回の博士論文の主テーマを、「電気集塵装置におけるオゾン・窒素酸化物の抑制技術とイオン風の有効利用に関する研究」とした。内容的には、次にあげる 3 つのサブテーマを、深耕することとした。

電気集塵装置からのオゾン発生の抑制技術 (第 3 章)

電気集塵装置からの NOx 発生の抑制技術 (第 4 章)

トゲ付平板によるイオン風の発生技術 (第 5 章)

最終章の 6 章では、3 つのサブテーマについて、横断的な考察を行い、論文全体としての結論と今後の展望についてまとめることとする。

### 3章 電気集塵装置からのオゾン発生抑制技術

#### (Reduction of Ozone Generation in an Electrostatic Precipitator)

Abstract: 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  $NO_2$ . 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.

#### 3.1 序論

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<sup>1, 13-16)</sup>。日本の都市部におけるトンネル排気性状の例を表3.1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3.1参照)である。その基本仕様は日本道路公団(現、日本高速道路株)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3.2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3.3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 3.1 都市部トンネルの典型的な排ガス性状

Table 3.1 Typical properties of exhaust gas in urban tunnel.

		Day average	Fluctuation range
SPM	Suspended Particulate Matter	0.20 mg/m <sup>3</sup>	0 ~ 2.0 mg/m <sup>3</sup>
NO <sub>2</sub>	Nitrogen dioxide	0.1ppm	0.05 ~ 1.5 ppm
NO <sub>x</sub>	Nitrogen oxides	1ppm	0.5 ~ 5 ppm

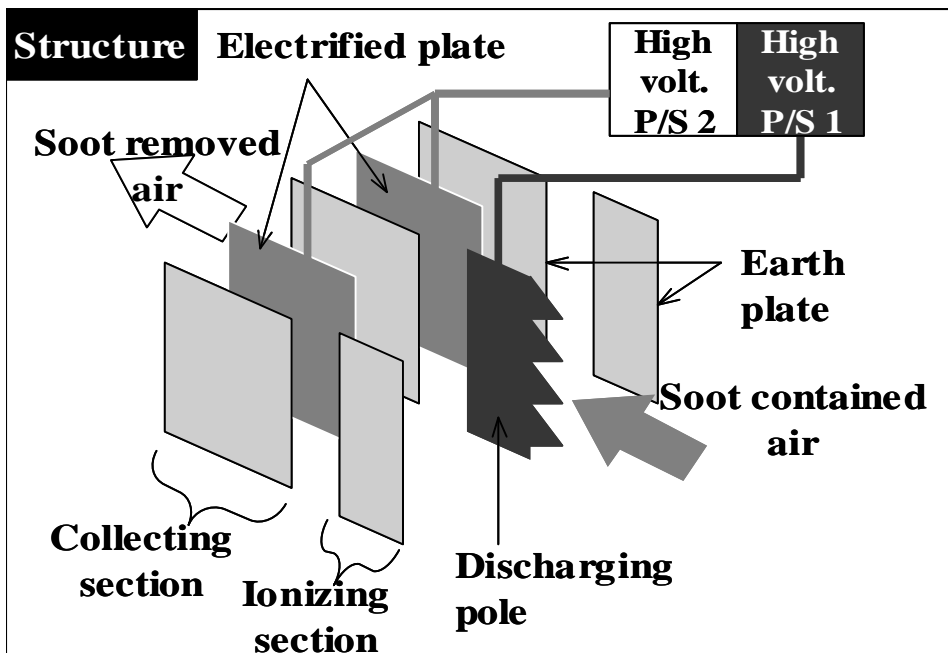


図 3.1 2 段集塵方式の構造と原理図

Fig. 3.1 Structure and theory of two stage type ESP.

表 3.2 トンネル用電気集塵装置の仕様の変遷

Table 3.2 Specification revisions of tunnel ESP for road tunnel.

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 <sup>3</sup> /s)]	(Approx.35 ) 1	55	110

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 3.3 ガス成分の規制値一覧

Table 3.3 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 <sub>2</sub> )	NO <sub>2</sub>	0.04 ~ 0.06 ppm	none	1 ppm
Ozone	O <sub>3</sub>	None (Existing as oxidant 0.06ppm )	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<sup>2,17-20</sup>。(図 3.2 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注目され，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<sup>3)</sup>，また板厚とストリーマの関係を示す報告<sup>4)</sup>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。

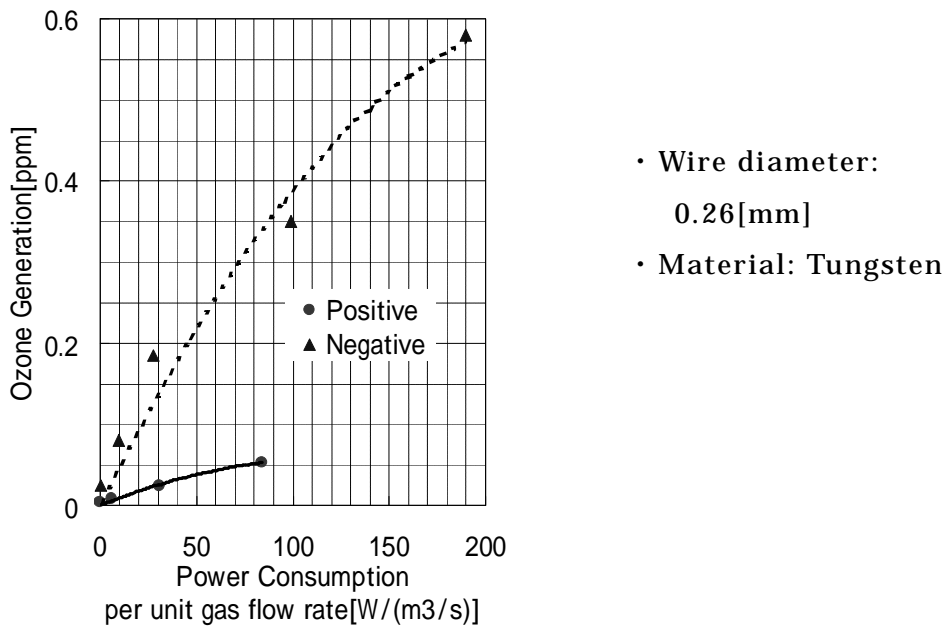


図 3.2 正・負コロナ放電のオゾン発生特性

Fig.3.2 Characteristics of ozone generation by positive or negative corona discharge

### 3.2 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 3.3 に実験装置の構成を，また表 3.4 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．

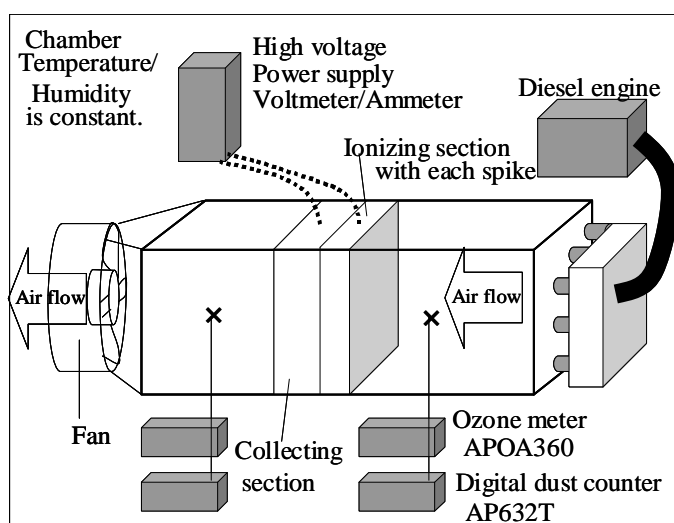


図 3.3 実験装置構成

Fig.3.3 Schematic diagram of tested ESP.

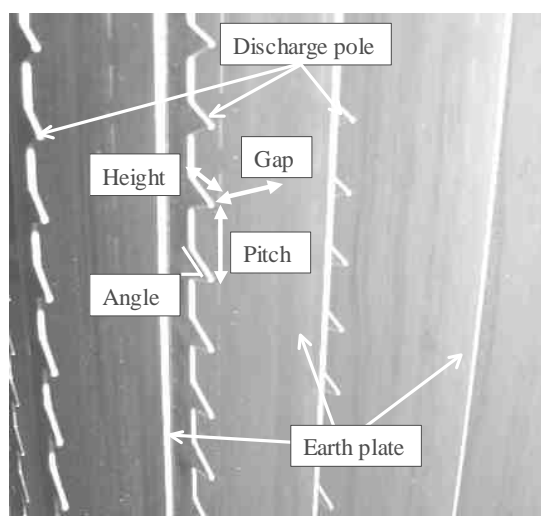


図 3.4 トゲ式放電極構成

Fig.3.4 Composition of spike electrode.

図 3.4 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 10mm に，Gap は 12mm に固定した．本実験におけるトゲ形状の実験条件を表 3.5 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  $5\text{m}^3/\text{s}$  とし，粉塵濃度を約  $0.5\text{mg}/\text{m}^3$  とした．（係数法濃度 1cpm が重量法濃度  $0.0031\text{mg}/\text{m}^3$  に対応．）オゾン発生量を測定する場合は，オゾンの発生量をより正確に測るために，処理風量を  $0.17\text{m}^3/\text{s}$  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．



表 3.4 実験装置の仕様および実験条件

Table 3.4 Specifications and conditions on experiments.

Items	Details
Duct	W;940mm , H;780mm , L;12,500mm
Flow rate	0.17 m <sup>3</sup> /s for measuring ozone. 5 m <sup>3</sup> /s for measuring soot collection. (9m/s for line velocity in ESP)
Ionizing section	(Positive discharge) W;900mm , H;720mm , L;300mm
	(Negative discharge) 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

表 3.5 トゲ形状の実験条件

Table 3.5 Condition of spike electrode.

Experimental case	Angle [deg]	Pitch [mm]	Unit per power consumption	
			[W/(m <sup>3</sup> /s)]	1
	20	4		98
	30	4		126
	40	4		103
	20	8		56
	30	8		108
	40	8		117
	20	12		70
追加 2	30	12		174
追加 2	40	12		103

1 : 図 3.8 の実験における実験条件を示す . 2 : 図 3.8 の実験のみ実施した .

### 3.3 結果と考察

図 3.5 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，放電電流の増加割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<sup>4)</sup>，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。

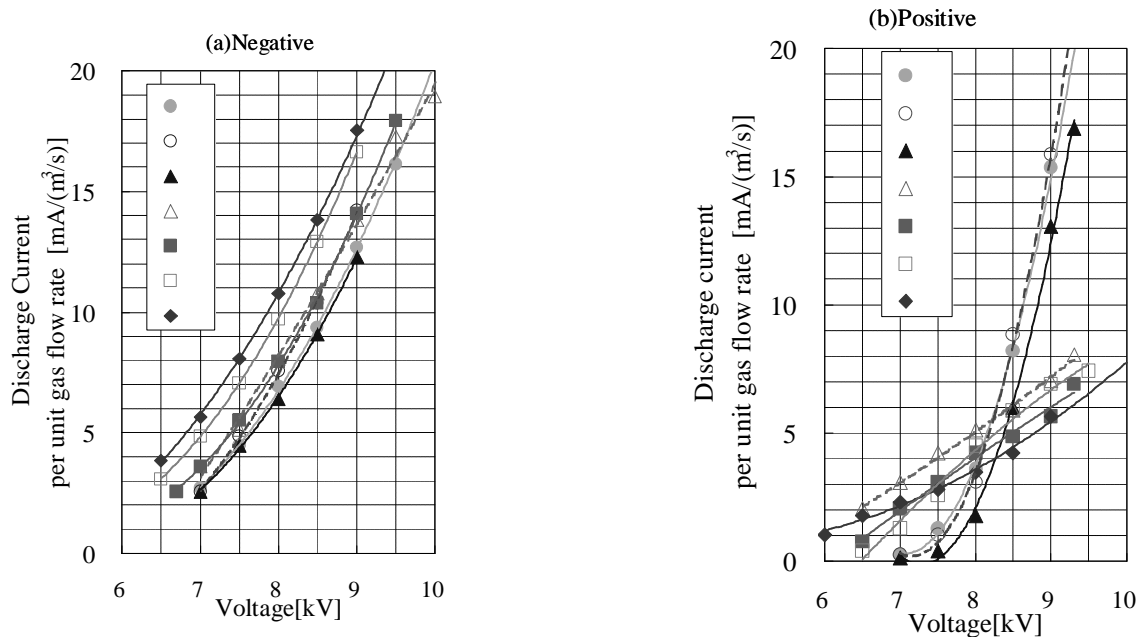


図 3.5 放電電流の電圧特性

Fig.3.5 Discharge current as a function of applied voltage.

次に図 3.6 にオゾン発生特性を示す。尚，条件 1 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。

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 2 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 2 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 3.7 にその結果を示す。

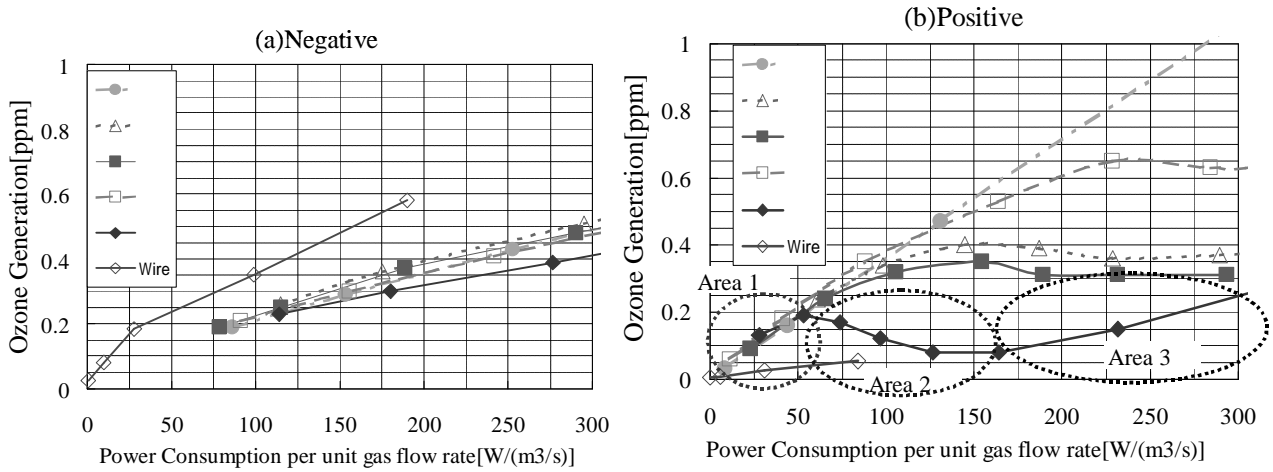


図 3.6 各実験条件での注入電力に対するオゾン発生濃度特性

Fig.3.6 Ozone concentration as a function of input power for experimental cases.

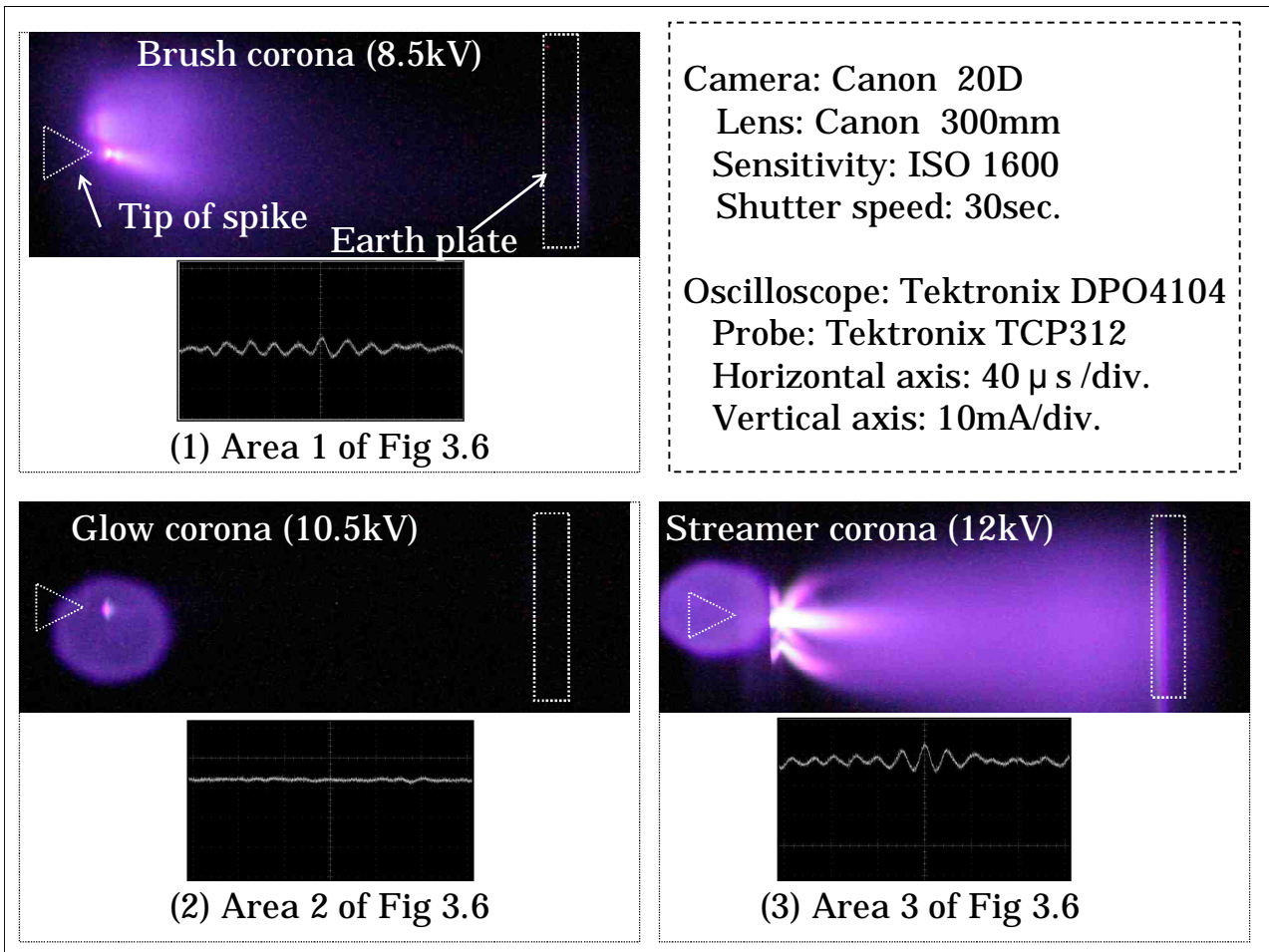


図 3.7 正荷電コロナ放電の様子と電流波形

Fig.3.7 Corona shape and Current ripple.

条件 について，コロナ放電開始から消費電力が約  $50\text{W}/(\text{m}^3/\text{s})$ 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 3.7(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<sup>2,5)</sup>。電流波形は，数十  $\mu\text{s}$  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。

次に消費電力約  $50\text{W}/(\text{m}^3/\text{s})$ から約  $150\text{W}/(\text{m}^3/\text{s})$ 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 3.7(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<sup>2)</sup>。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  $150\text{W}/(\text{m}^3/\text{s})$ 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 3.7(3)に示すように接地極近辺まで延びたストリーマーが観測された。ストリーマーコロナ放電に分類される放電様態である<sup>2)</sup>。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 以外の条件 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 における領域 2 は，消費電力約  $170\text{W}/(\text{m}^3/\text{s})$ から約  $270\text{W}/(\text{m}^3/\text{s})$ ，条件 では，消費電力約  $250\text{W}/(\text{m}^3/\text{s})$ から約  $350\text{W}/(\text{m}^3/\text{s})$ (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 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  $318\text{W}/(\text{m}^3/\text{s})$ ，オゾン発生量  $1.13\text{ppm}$  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 の放電様態は、消費電力約  $50\text{W}/(\text{m}^3/\text{s})$ まではブラシコロナが観察され，それ以降はストリーマー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<sup>6)</sup>。

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 ストリーマーコロナに遷移すると言われている<sup>2)</sup>。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 がストリーマーコロナ領域，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 3.8 は，電界強度を  $0.67\text{kV}/\text{mm}$ (Gap12mm,印加電圧  $8\text{kV}$ )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 3.5 の から とした．尚，欠測した条件 は再測定した．これより，正コロナ放電においては，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ーが延びる状態でコロナ放電が発生していたからと推察する<sup>5,7,8,9)</sup>．よって，ストリーマー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ーの伸展が抑制され<sup>8)</sup>，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ー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 3.9 に電極条件（表 5， ～ ）と集塵効率の関係を示す．消費電力を  $50\text{W}/(\text{m}^3/\text{s})$  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%前後の集塵効率を得られた．これは安定なグロー放電が発生したため<sup>10-12)</sup>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（ピッチ 4mm），（8mm）および（12mm）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（ピッチ 4mm）と（8mm）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（ピッチ 4mm）と（8mm）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，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 12mm においては，トゲピッチが狭いとストリーマーコロナの形態になりやすく<sup>5)</sup>，ストリーマー中では正負両極性のイオンが存在する<sup>8)</sup>．このため，荷電効率が低下する<sup>4)</sup>ことが考えられる．またストリーマー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，ストリーマーコロナの場合，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，ストリーマーの伸展が抑制され，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．

最後に，実際のトンネル現場で，約 2 年間稼動した電気集塵装置のトゲの状況写真を図 3.10 に示す．定期的な水洗により堆積物は少ない．集塵効率の低下も発生していない．

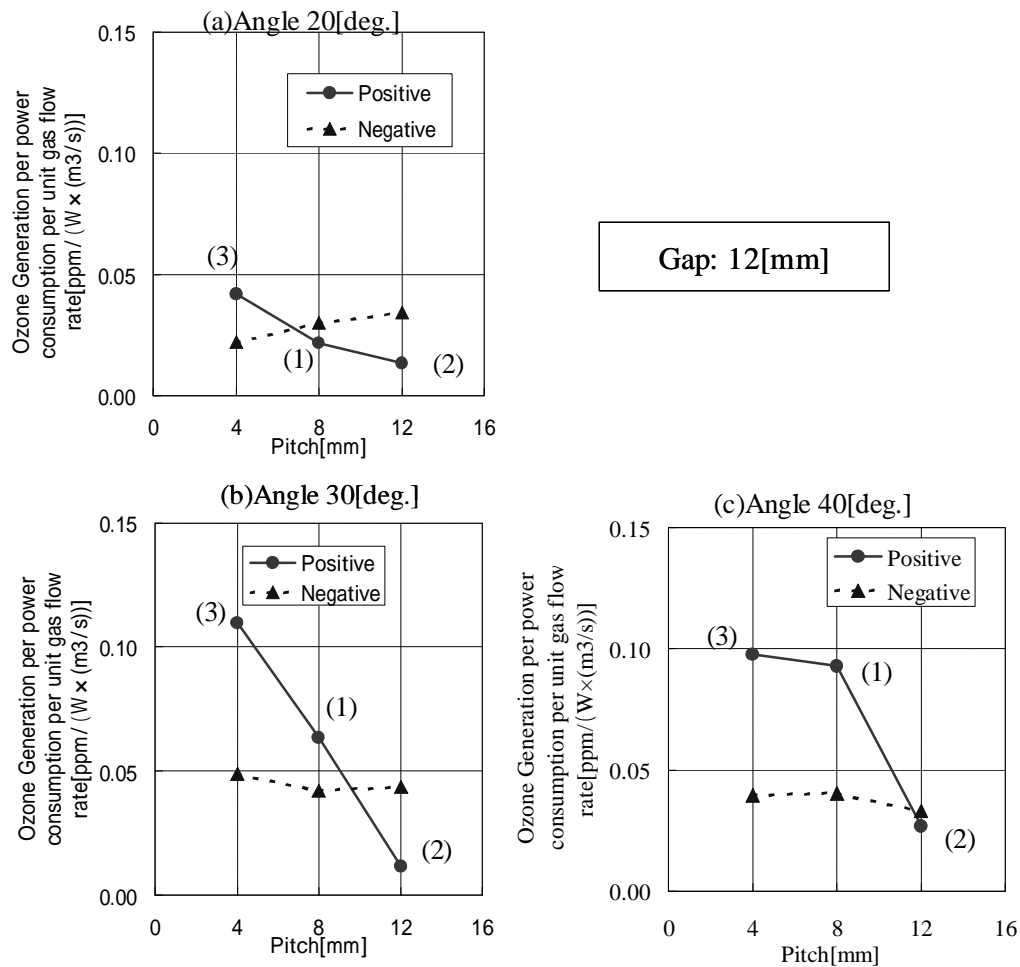


図 3.8 オゾン発生濃度のトゲピッチ特性

Fig.3.8 Ozone concentration as a function of spike pitch.

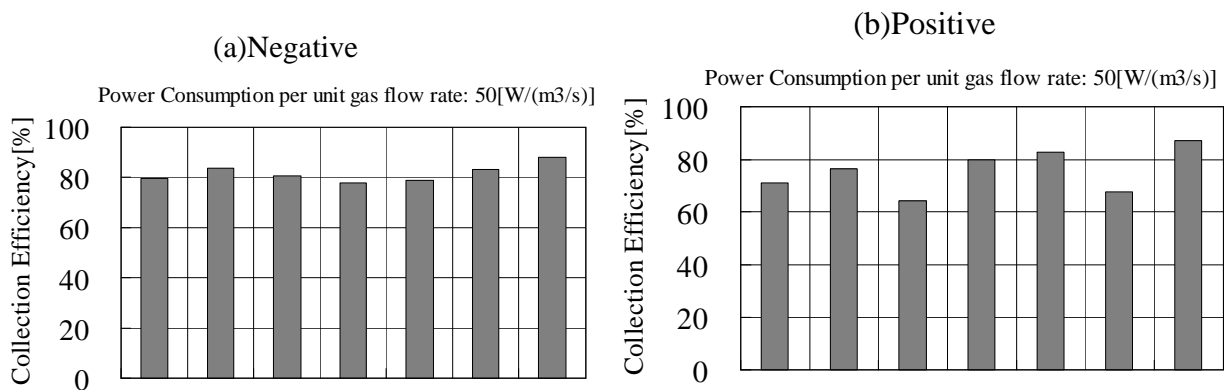


図 3.9 . 各実験条件における集塵効率

Fig.3.9 Collection efficiency in each case.



図 3.10 稼動後約 2 年目のトゲ

Fig.3.10 Spikes after two years operation

### 3.4 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ー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ーが発生したためと考えられる。

### 3章の参考文献

- 1) 水野 彰：2007 年度第一回静電気学会研究会予稿集，p38 -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，藤田洋司：平板突起電極と平板電極間のコロナ放電によるオゾン生成特性，静電気学会誌，30，3(2006)p146
- 4) 柳下大樹，高木康裕，江原由泰，端慶覧章朝，河野良宏，安本浩二：電気集じん装置における放電電極形状改善による発生オゾンの低減，電気学会プラズマ研究会資料 PST-06-35(2006)p1
- 5) 三好保憲：平等電界放電と不平等電界放電 コロナおよび火花 その2，静電気学会誌，10，6(1986)p552
- 6) 三好保憲：負針対平板ギャップ(空气中)における放電進展過程 コロナおよび火花 その4，静電気学会誌，12，2(1988)p129
- 7) 三好保憲：コロナ放電の機構について，静電気学会誌，1，1(1977)p52
- 8) 三好保憲：放電路進展機構の最近の動向，日本物理学会誌，第30巻第8号(1975)p591
- 9) L.B.Loeb：Electrical Coronas，University of California Press(1965)
- 10) 三好保憲：気体の伝導，材料科学，Vol.8，No.1(March 1971)p33
- 11) 三好保憲：放電開始の意義 コロナおよび火花 その1，静電気学会誌，10，6(1986)p543
- 12) 三好保憲：空气中負性コロナの過渡特性 コロナおよび火花 その3，静電気学会誌，12，1(1988)p54
- 13) 端慶覧章朝，安本浩二：富士電機システムズのトンネル用電気集塵装置，静電気学会誌，32，5(2008)p192
- 14) 細野洋，片谷篤史：松下エコシステムズの空気浄化装置，静電気学会誌，32，5(2008)p203
- 15) 上田泰稔，米村将直，三宅一明：トンネル用排ガス処理装置の開発について，静電気学会誌，32，5(2008)p207
- 16) 荒生靖史：トンネル換気設備の現在と将来，静電気学会誌，32，5(2008)p210
- 17) A.Yehia,A.Mizuno：Silver discharge electrode for suppression of ozone generation in positive dc corona，Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference，40<sup>th</sup>3(2005)p1828
- 18) K.C.Noh,Y.H.Lee,M.D.Oh：Generation characteristics of ozone and NOx and particle removal in the electrostatic precipitators, Transactions of the Korean society of mechanical engineers.B, vol.27 no.10(2003)p1442
- 19) A.S.Viner,P.A.Lawless,D.S.Ensor,L.E.Sparks：Ozone generation in dc-energized electrostatic precipitators, IEEE transactions on industry applications, vol.28 no.3(1992)p504
- 20) T.Ohkubo,S.Hamasaki,Y.Nomoto,J.S.Chang,T.Adachi：The effect of corona wire heating on the ozone generations in an air cleaning electrostatic precipitator，IEEE transactions on industry applications, 88CH2565-0(1988)p1647



## 4章 電気集塵装置からのNO<sub>x</sub>発生の抑制技術

### (Reduction of NO<sub>x</sub> Generation from Electrostatic Precipitators)

Abstract: Electrostatic Precipitators (ESPs) have recently been applied in environmental air purification for congested car roads. When ESPs are used to remove suspended particles, corona discharges generate NO<sub>x</sub> (=NO + NO<sub>2</sub>), or oxidize NO in contaminated environmental air into more toxic NO<sub>2</sub>. This drawback of ESPs should be improved for more wide use of ESPs as a tool for environmental air purification. In this study, effectiveness has been evaluated of the non-woven sheet made of activated carbon fiber (ACF) attached on collection electrodes of an ESP. The experimental results show that this method can not only minimize NO<sub>x</sub> generation from ESPs but also improve collection efficiency of suspended particles.

#### 4.1 序論

この十数年間，環境意識の高揚から，大都市部の混雑する自動車道路沿道における，大気中のSPM (Suspended particle matter, 浮遊粒子状物質) や窒素酸化物のNO<sub>x</sub> (Nitrogen oxides), NO<sub>2</sub> (Nitrogen dioxide), NO (Nitrogen mono-oxide) を除去する研究が各所でなされている<sup>1-6)</sup>。その背景には，交通が混雑する沿道近隣の居住地域で，環境基準(SPMの日平均値が0.1mg/m<sup>3</sup>以下，NO<sub>2</sub>の日平均値が0.04~0.06ppmのゾーン以下)が達成されないケースがある<sup>4,6,7)</sup>ことがあげられる。沿道大気におけるNO<sub>x</sub>中のNO<sub>2</sub>の割合(ppm比)は，一般的に2割~5割程度で，残りがNOだと言われているが，独立行政法人環境再生保全機構の報告書における現地実測結果<sup>8)</sup>からも，このことは妥当であると考えられる。沿道大気中のSPMを除去する電気集塵装置に関し，環境再生保全機構による報告書<sup>9)</sup>においては，次の点が研究のポイントであることが示されている。

- ・ 電気集塵装置は，車道と歩道とを分離する隔壁，もしくは車道の中央分離帯の隔壁としての機能を有すること。
- ・ 小型化低電力化を実現するために，通風機を用いずに車輦の走行風や自然風を利用して，通風し，集塵する方式(自然通風式)
- ・ そのためには，通風抵抗を極力小さくした平行平板型の構造にすること。(1段集塵)
- ・ 沿道に設置するので，集塵部分の高圧電源を分散化し，10mA以下の小容量とし，感電事故に対する安全性を高めること。

電気集塵装置を用いる場合の問題は，コロナ放電により，NO<sub>x</sub> (=NO + NO<sub>2</sub>)

が生成されることである。この問題に関して、幾つかの研究<sup>10,11,18-20)</sup>が発表されており、次の点が報告されている。

- ・ 正荷電の方が、負荷電よりも NO<sub>x</sub> 生成量が多い
- ・ 直流コロナで生成した NO<sub>x</sub> の大部分は NO<sub>2</sub> である
- ・ 高湿度の方が、NO<sub>x</sub> 生成量が多い

また、電気集塵のコロナ放電によりオゾン (O<sub>3</sub>) が生成され<sup>12,13)</sup>、これが沿道大気中の NO と反応し、NO よりも毒性が強い NO<sub>2</sub> を生成することも報告<sup>9,14)</sup>されている。

沿道大気中の NO<sub>x</sub> を、活性炭繊維 ACF (Activated Carbon Fiber) で除去する研究が報告<sup>15)</sup>されている。

前記の背景から、沿道大気中の SPM を除去する電気集塵装置には、次の点が要求されている。

- ・ 安全性確保の観点から、コロナ放電の消費電力が小さいこと
- ・ コロナ放電による NO<sub>x</sub> 生成量が小さいこと
- ・ コロナ放電によるオゾン生成量が小さいこと

今回これらの要求を満たすために、電気集塵装置の集塵極板に、不織布である ACF シートを用い、NO<sub>x</sub> とオゾンの生成量を抑制を試みる実験を行なった。

## 4.2 実験手順

本実験では、平行平板型の 1 段式電気集塵装置 (以下 ESP と記す) を用いて、集塵効率、コロナ放電による NO<sub>x</sub> 生成量、オゾン生成量を消費電力とともに評価した。集塵効率の目標値は 80% とした。図 4.1 に ESP の外観を示す。荷電極板の放電極としては材質 SUS304 板厚 0.6mm の平板の両端部 (流入側と流出側) にトゲを設けた構造とした。接地極板には同じく SUS304 板厚 0.6mm の平板を使用した。ここで接地極板には、ステンレスの平板のみのケースと、ステンレス平板の両面に厚さ約 3mm の ACF (大阪ガス製: コールタール原料のピッチ系: 型番: FN-150-P20: 比表面積約 500 m<sup>2</sup>/g: 繊維径約 18 μm: 平均細孔径 15 : 含有金属比 0.01 から 5 重量%の間) を貼り付けた 2 ケースを試作準備した。荷電極板面と隣接する接地極板面の間隔 (Gap) は、両ケースとも 18mm とし、トゲの先端角 (Angle) は 30 度、高さ (Height) は 10mm、ピッチ (Pitch) は 16mm とした。(図 4.2 参照)

図 4.3 に実験装置を、表 4.1 に実験装置の仕様を示す。自然通風を用いる ESP ではあるが、均一な通過風速条件での効率を測定するために、ファンを用いた強制通風式の実験ダクトを用いた。ESP の通過風速は、インバータ制御により 0.5m/s で統一し、正または負の直流高電圧を印加した。ESP の風上側約 2m と風下側約 3m の位置に、粉塵濃度計と NO<sub>x</sub> 分析計とオゾン濃度計の計測ポイントを定めた。集塵効率を計測する場合は、ダクトの風上側からディーゼルエンジンの

排気ガスを導入し，ESP 入口の粉塵濃度を約  $0.5\text{mg}/\text{m}^3$  になるように調整した．  
 （係数法濃度  $1\text{cpm}$  が重量法濃度  $0.0031\text{mg}/\text{m}^3$  に対応．）

また， $\text{NO}_x$  濃度（ $\text{NO}_2$  および  $\text{NO}$  濃度も含む）とオゾン濃度を測定する場合は，  
 エンジン排ガス中の  $\text{NO}_x$  が計測の邪魔をするので，エンジンを停止し，室内空気を  
 通風して ESP 前後の濃度差から， $\text{NO}_x$  増加量とオゾン増加量を求めた． $0.5\text{m}/\text{s}$   
 にて通風かつ高電圧印加中にエンジンの運転と停止を行い，印加電圧と放電電流  
 の値がエンジンの運転停止に影響されないことを確認したうえで，実験を行なっ  
 た．実験のケースは以下の 4 つである．

- ・ ケース 1（「正荷電」）：正荷電 且つ ACF 無し
- ・ ケース 2（「負荷電」）：負荷電 且つ ACF 無し
- ・ ケース 3（「正荷電 ACF」）：正荷電 且つ ACF 有り
- ・ ケース 4（「負荷電 ACF」）：負荷電 且つ ACF 有り

実験中の相対湿度は 35 から 45Rh%，気温は 35 から 40 と比較的安定していた．

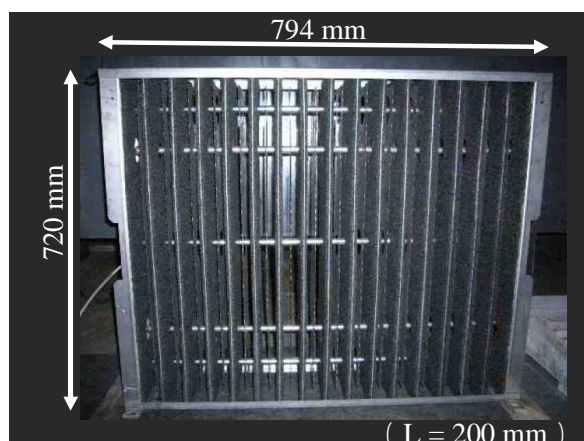


図 4.1 ESP の外観

Fig. 4.1 Appearance of the ESP.

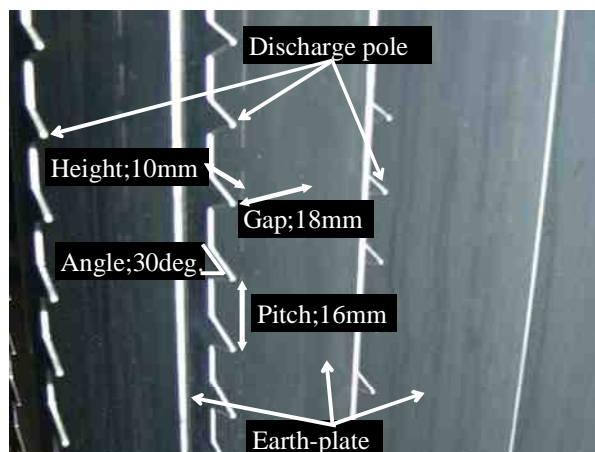


図 4.2 トゲの構造

Fig. 4.2 Structure of the electrodes.

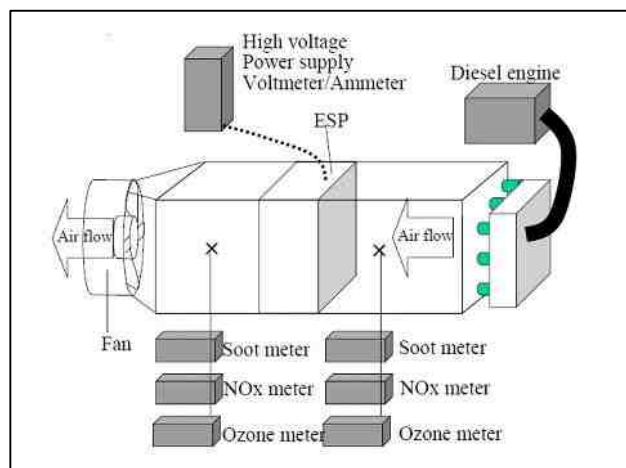


図 4.3 実験装置

Fig.4.3 Test equipment.

表 4.1 . 実験装置の仕様

Table 4.1 Specifications on test equipment.

Items	Details
Duct	W;940mm , H;780mm , L;12,500mm
Flow rate	0.23 m <sup>3</sup> /s (0.5m/s of line velocity just in front of ESP)
ESP without ACF	W;775mm , H;720mm , L;200mm Number of spike plate lanes ; 19
ESP with ACF	W;794mm , H;720mm , L;200mm Number of spike plate lanes ; 16
Meters	For soot concentration;AP632T type (SHIBATA,light scattering) For NOx concentration ; APNA-370type (HORIBA, chemi-luminescence) For ozone ; APOA360 type (HORIBA , ultraviolet absorption)
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,Ripple ; ±3% or less

#### 4.3 結果と考察

図 4.4 は、実験ケース 1 から 4 の、印加電圧に対する放電電流の特性である。各ケースとも印加電圧の上昇とともに放電電流は増加している。

「正荷電」と「負荷電」については 12kV 以上でスパークが多発し、電圧の印加が難しくなった。同じ電圧では「負荷電」の方が「正荷電」よりも放電電流が大きかった。

「正荷電 ACF」については 7.5kV 以上でスパークが多発し、また「負荷電 ACF」については 6.5kV 以上でスパークが多発し、電圧の印加ができなくなった。同じ電圧では、今度は「負荷電 ACF」の方が「正荷電 ACF」よりも放電電流が小さくなった。印加電圧の極性にかかわらず、印加電圧の増加に対する放電電流の増加量は、ACF 付き接地極板を用いた場合のほうが、ACF なしの場合よりも大きかった。

図 4.5 は、「正荷電」の場合の放電形態である。印加電圧を徐々に上昇させると、最初の放電はブラシコロナであり (b) ,さらに電圧を上昇させると最終的にはストリーマーコロナ (c) に進展している。写真の (c) では、放電空間全体にストリーマーが広がりながら伸びている。ブラシコロナからストリーマーコロナへの変化は電極の形状に依存していることが報告されている<sup>14)</sup>。また、「正荷電」の場合の放電発光色は、ブラシコロナ放電であれストリーマー放電であれ、「青白い

光」を放っていた。

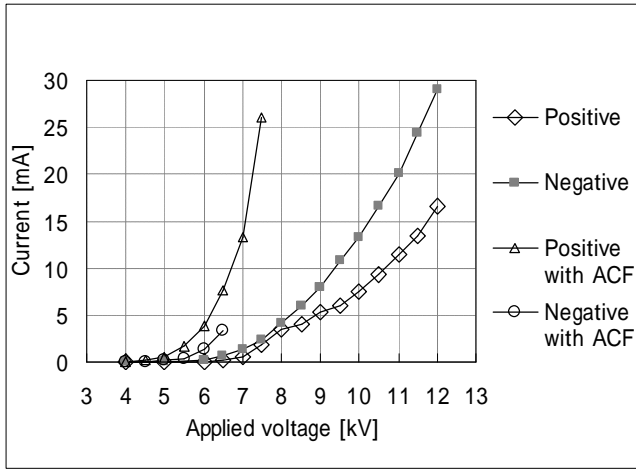


図 4.4 放電電流特性

Fig.4.4 Voltage-current characteristics.

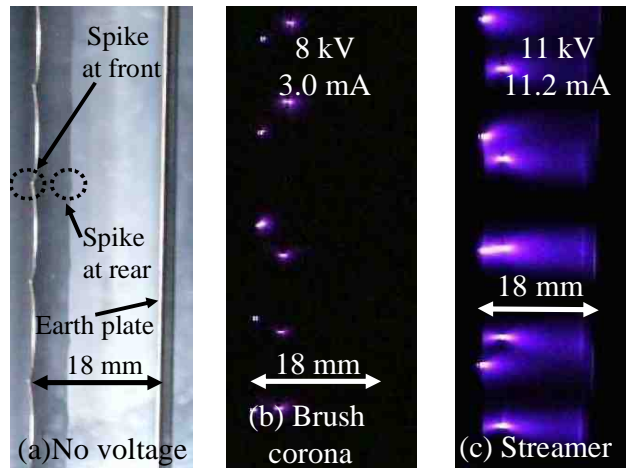


図 4.5 ケース(1) 正荷電(ACF無し)

Fig.4.5 CASE(1) Positive without ACF.

図 4.6 は、「負荷電」の場合の放電形態である。印加電圧を徐々に上昇させると、放電極トゲ先端の発光の強さが増した (a, b, c の順)。あくまでもトゲ先端の「点」からのみ放電するグローコロナ放電による発光であった。放電の発光色は、「やや赤味がかかった白い光」であった。

図 4.7 は、「正荷電 ACF」の場合の放電形態である。(a)の写真では、印加電圧を徐々に上昇させると、ACF 表面が電界により分極帯電し、毛羽立っている様子が伺える (A 部分)。尚この写真は、通風しない状態で撮影したものであり、通風時にはこの毛羽立ちが寝る方向に傾くものと考えられる。(b)の写真では、トゲの先端が放電していることが見取れるが (B 部分)、もうひとつ ACF 表面の毛羽立ちの先端部からも放電している様子が伺える (C 部分)。トゲの先端からは正のコロナ放電が、また ACF 表面の毛羽立ちの先端部からは負のコロナ放電が、双極のイオン場を形成しながら、同時に発生していると考えられる。7.5kV 以上でスパークが多発した理由のひとつとして、この毛羽立ちにより Gap 間隔が見かけ上小さくなったことが挙げられる。

図 4.8 は、「負荷電 ACF」の場合の放電形態である。(a)の写真は、スパークした瞬間を示している。A 部分を見ると、「正荷電 ACF」の場合と同様に ACF 表面が電界により分極帯電し、毛羽立っている様子が伺える。(b)の写真は、スパークしていないときの様子である。B 部分には、放電極のトゲ先端からの点発光が見られる。C 部分では、ACF 表面からストリーマーの放電光が点在しているのが伺える。印加電圧の上昇とともに毛羽立った ACF 繊維の先端から、より多くのストリーマーが発生した。このことにより、6.5kV という低い電圧で、スパークの多発を招き、印加電圧の更なる上昇が困難となった。

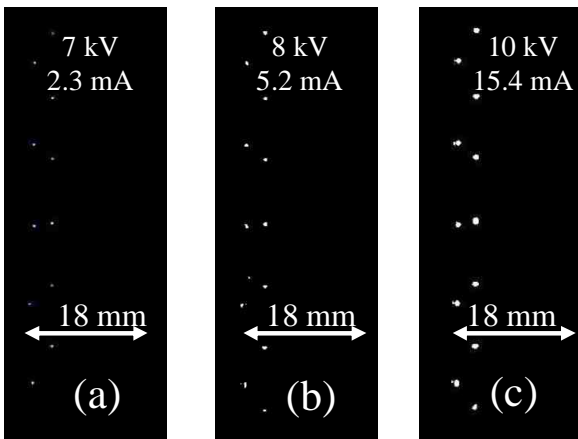


図 4.6 ケース(2) 負荷電 (ACF 無し)  
Fig.4.6 CASE(2) Negative without ACF.

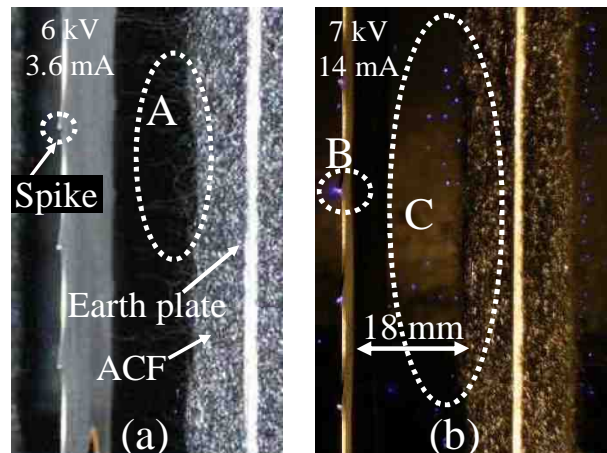


図 4.7 ケース(3) 正荷電 (ACF 有り)  
Fig.4.7 CASE(3) Positive with ACF.

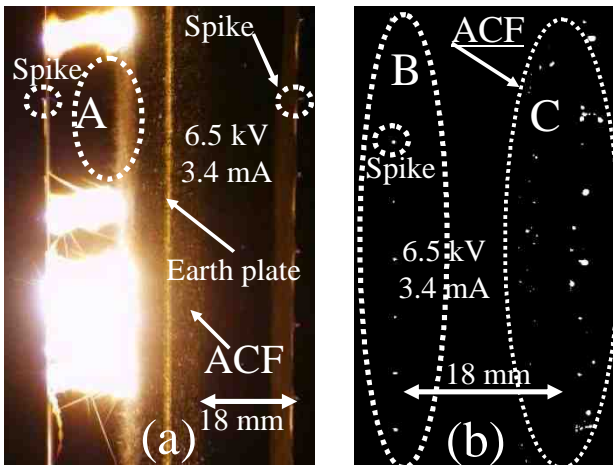


図 4.8 ケース(4) 負荷電 (ACF 有り)  
Fig. 4.8 CASE(4) Negative with ACF.

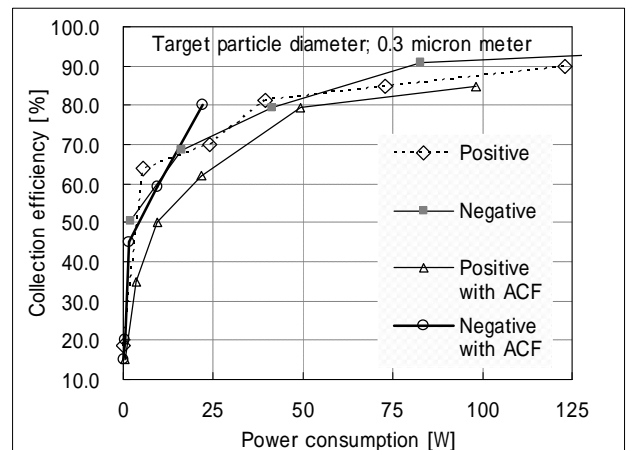


図 4.9 各ケースの集塵効率  
Fig. 4.9 Collection efficiency.

図 4.9 は、各実験ケースの、消費電力に対する集塵効率の特性である。各ケースとも消費電力の上昇とともに集塵効率は増加している。目標集塵効率である 80%に到達する各ケースの消費電力は次の通りであった。

- ・ ケース 1 (「正荷電」) : 40W (9 kV, 4.4 mA)
- ・ ケース 2 (「負荷電」) : 42W (8 kV, 5.2 mA)
- ・ ケース 3 (「正荷電 ACF」) : 49W (6.5kV, 7.6 mA)
- ・ ケース 4 (「負荷電 ACF」) : 22W (6.5kV, 3.4 mA)

「正荷電」と「負荷電」の消費電力については、その大小を論ずるよりも、「どちらの場合でも約 40W で集塵効率 80%を達成できた」とみなしてよいと考える。

80%の同一の集塵効率という条件下で比較すると、「正荷電 ACF」は「正荷電」に比べて、消費電力が約 2 割大きい。このケースでは、ACF が存在するので、正コロナと負コロナが、双極イオン場を形成しながら共存し、より大きな放電電流



が流れる。「正荷電」で 6.5kV の時の放電電流は 0.5 mA であったが、「正荷電 ACF」においては 7.6 mA であった。

「負荷電 ACF」は「負荷電」に比べて、スパーク電圧が低いので印加電圧自体も低く抑えられる。「負荷電」で 6.5kV の時の放電電流は 1.5mA であったが「負荷電 ACF」では 3.4 mA であった。「負荷電 ACF」の場合にも、双極イオン場が形成された。「負荷電 ACF」は、「正荷電 ACF」と比べ、印加電圧上昇に伴う電流の増加量が少ない。言い換えると、ACF の有無によるコロナ電流の比は、正荷電の場合  $7.6/0.5 = 15.2$  なのに対し、負荷電では  $3.4/1.5 = 2.2$  である。

B.Sung らは、静電植毛を施した接地電極を用い、放電線に負電圧を印加し、電気集塵装置の実験を行った。この実験において、静電植毛によって接地電極近傍のイオン風を抑制できるならば、粒子の移送に相乗効果を生み、集塵効率の向上が図れることが報告されている<sup>17,21)</sup>。「負荷電 ACF」においても同様の相乗効果があると考えられる。「負荷電 ACF」では双極のイオン場が現れた時に、相乗効果によって、より低い消費電力(約 5 割減)で高い集塵効率を得られたものと考えられる。また B.Sung らは、静電植毛を施した電気集塵装置には、以下の点で集塵効率の向上が見込めると報告している。

- ・ 植毛繊維の先端で、より強いグラディエント力により粒子が捕集されるので、再飛散が起こりにくいこと。
- ・ 静電植毛が集塵面積を大きくしていること。

図 4.7 および図 4.8 における、ACF 繊維の先端からの放電は、逆電離現象に似ているが、前記 2 点が集塵効率の低下を抑えていると考えられる。また、ACF 繊維の先端からの放電が、ACF の表面全体からではなく、部分的であることも、集塵効率低下を免れる原因となっている可能性がある。

図 4.10(a)(b)に消費電力に対する NO<sub>x</sub> の増加量を示す。(図 4.10(a)の部分拡大が図 4.10(b)である。)今回実験の全ケースにおいて、ESP 前後で増加した NO<sub>x</sub> は、全て NO<sub>2</sub> であり、NO は検出されなかった。また、図 4.11(a)(b)に消費電力に対するオゾンの増加量を示す。(図 4.11(a)の部分拡大が図 4.11(b)である。)各ケースの実験結果を要約すると以下の通りとなる。

#### (1) 「正荷電」

オゾン増加量は消費電力とともに増加し、20W 以上でいったん減少し、70 W 以上で再び増加している。これと同じ傾向が過去の文献<sup>14)</sup>でも報告されており、その理由は放電形態がブラシコロナ グロー ストリーマーへと変化するからである。NO<sub>x</sub> 発生量についても、オゾンと同じように増減する傾向が現れていることが今回判明した。このことから、正コロナにおける NO<sub>x</sub> の生成は放電形態に依存していると考えられる。

(2) 「負荷電」

NOx 増加量およびオゾン増加量は消費電力の増加とともにほぼ直線的に増加している。「負荷電」は「正荷電」よりも、NOx 増加量は小さく、概してオゾン増加量は大きい。このことは過去の文献<sup>10,11,13,16)</sup>にも示されており、今回の実験結果は概ねこれらに合致している。

(3) 「正荷電 ACF」

NOx 増加量は、「負荷電」と同じく消費電力の増加とともにほぼ直線的に増加している。オゾン増加量も、「負荷電」と同じく消費電力の増加とともにほぼ直線的に増加しているが、オゾン増加量は全 4 ケースの中で一番小さい。この理由は、ACF 繊維先端からの、負コロナ放電により発生したオゾンが、ACF の活性炭により、直ちに還元されて酸素に変化したためではないかと推察する。

(4) 「負荷電 ACF」

NOx 増加量は、全 4 パターンの中で一番小さく、NOx は増加しない。オゾン増加量は、「負荷電」とほぼ同じであった。

(5) 「正荷電 ACF」と「負荷電 ACF」に共通して

図 4.10(a)(b)で、NOx の減少を示す現象が現れた。「正荷電 ACF」では、10W 以下で NOx が減少し、「負荷電 ACF」では、25W 以下で減少した。この理由は、ACF が NOx (とりわけ NO<sub>2</sub>) を吸着したためと考えられる。

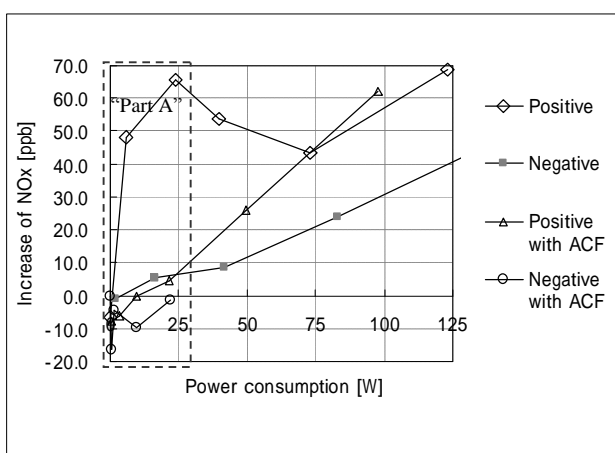


図 4.10(a) 各ケースの NOx 増加量

Fig. 4.10(a) Generation of NOx.

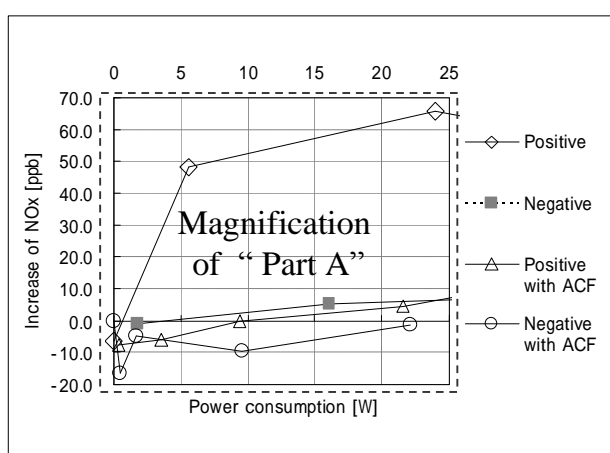


図 4.10 (b)各ケースの NOx 増加量 (拡大)

Fig. 4.10(b) Generation of NOx (Magnification)



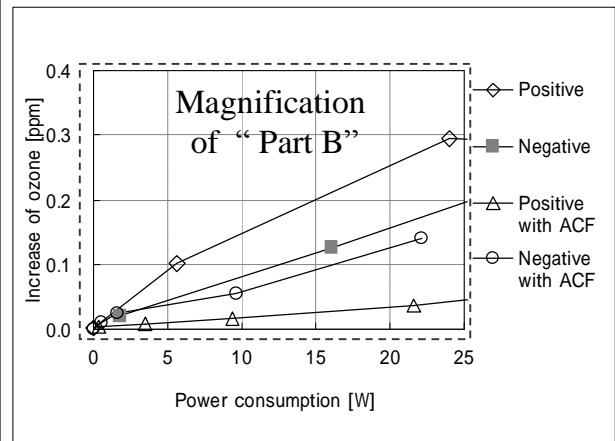
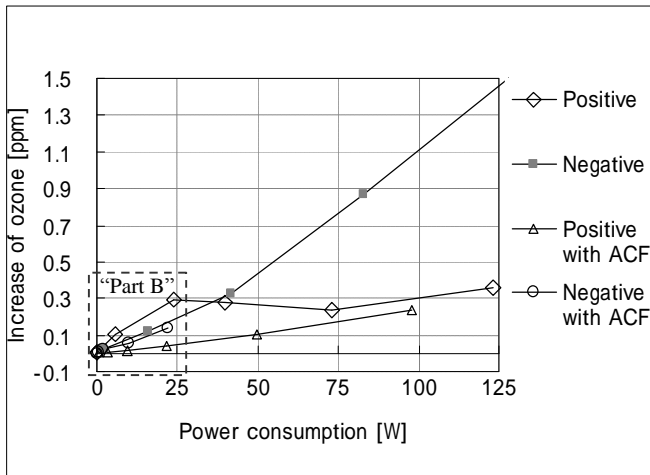


図 4.11(a) 各ケースのオゾン増加量

図 4.11(b) 各ケースのオゾン増加量(拡大)

Fig. 4.11(a) Generation of ozone

Fig. 4.11(b) Generation of ozone (Magnification)

#### 4.4 追加実験と考察

図 4.7(b)および図 4.8(b)の写真に見られる通り、「正荷電 ACF」と「負荷電 ACF」は、共に荷電極板のトゲから放電するが、接地極板の ACF からも放電している。正コロナと負コロナが共存していることは前述済みであるが、「正荷電 ACF」と「負荷電 ACF」は、共に正コロナと負コロナの共存状態にありながら、両者の特性にかなりの隔たりがある。表 4.2 に両者の比較を示すが、参考のために、ACF を用いない「正荷電」と「負荷電」の比較を表 4.3 に示す。表 4.2 と表 4.3 には、各比較項目の大小関係を "Large" と "Small" で表記した。二つの表を見比べると、ACF が有るか無いかで各特性がかなり異なることが分かる。

表 4.2 「正荷電 ACF」と「負荷電 ACF」との比較

Table 4.2 Comparison of "Positive ACF" and "Negative ACF"

	Positive ACF		Negative ACF	
Power consumption for 80% collection	49 W	<b>Large</b>	22 W	Small
NOx generation at 25 Watt	8 ppb	<b>Large</b>	0 ppb	Small
Ozone generation at 25 Watt	50 ppb	Small	150 ppb	<b>Large</b>

表 4.3 「正荷電」と「負荷電」との比較

Table 4.3 Comparison of "Positive" and "Negative"

	Positive		Negative	
Power consumption for 80% collection	40 W	Small	42 W	<b>Large</b>
NOx generation at 25 Watt	65 ppb	<b>Large</b>	7 ppb	Small
Ozone generation at 25 Watt	300 ppb	<b>Large</b>	200 ppb	Small

「正荷電 ACF」と「負荷電 ACF」は，共に正コロナと負コロナの共存状態にありながら，なぜ両者の特性に隔たりがあるのであろうか．この疑問を解明するために，トゲ付の荷電極板 1 枚と，ACF 付の接地極板 1 枚のミニチュア版実験装置（図 4.12 参照）を新たに用意し，より詳細な放電電流値の計測と放電状況の目視観察を行うこととした．接地板は，厚さ 0.5mm のプラスチック製であり，接地板上の ACF はエリア 1 とエリア 2 に，同一面積にて電氣的に 2 分割されており，各エリアの電流を個別に計測できるようにした．荷電極板に印加する電圧を，+6.5kV（正荷電）と -6.5kV（負荷電）とし，エリア 1（トゲ直下部）とエリア 2（もう片方）の電流値を計測した．実験結果を図 4.13 と図 4.14 に示す．また ACF の各部を，エリア A からエリア D までの，4 つのエリアに分けて命名し，ACF における 4 エリアの放電状況を，目視観察した．ACF 表面 1 平方センチメートルにおける放電発光した数を，点数（ポイント数）として数値化し，併せて両図に記入した．

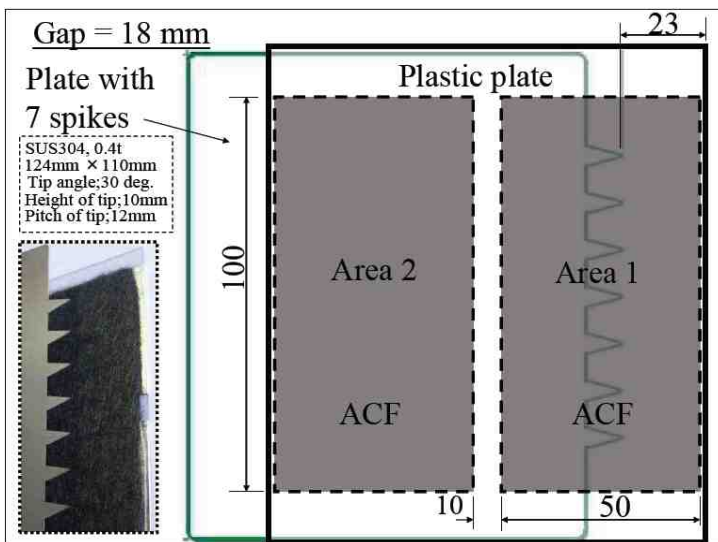


図 4.12 追加実験装置

Fig. 4.12 Additional test equipment

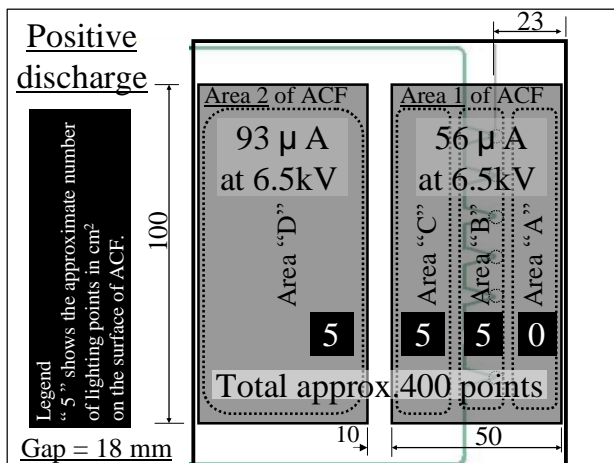


図 4.13 実験結果（正荷電 ACF）

Fig. 4.13 Test result (Positive ACF)

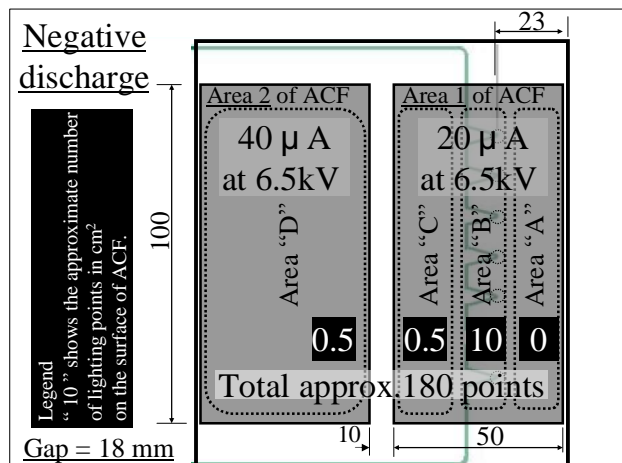


図 4.14 実験結果（負荷電 ACF）

Fig. 4.14 Test result (Negative ACF)

「正荷電 ACF」(図 4.13)の結果を要約すると、次の通りである。

エリア 2 の放電電流値の方は、エリア 1 の電流よりも大きかった。  
( $93 \mu\text{A} \div 56 \mu\text{A} = \text{約} 1.7 \text{倍}$ )

ACF は、エリア A では発光しなかった。(0 点/cm<sup>2</sup>)

ACF 発光点数は、エリア B, C, D は全て同程度の 5 点/cm<sup>2</sup>であった。(まんべんなく発光する。特にトゲ直下投影部で、発光が多かったり、少なかったりするよう  
なことはなかった。)

「負荷電 ACF」(図 4.14)の結果を要約すると、次の通りである。

エリア 2 の放電電流値の方は、エリア 1 の電流よりも大きかった。  
( $40 \mu\text{A} \div 20 \mu\text{A} = 2 \text{倍}$ )

ACF は、エリア A では発光しなかった。(0 点/cm<sup>2</sup>)

ACF の発光点数は、トゲ直下投影部のエリア B で著しく多かった。(10 点/cm<sup>2</sup>)

エリア C とエリア D では、発光点数が非常に少なかった。(0.5 点/cm<sup>2</sup>)

「正荷電 ACF」のように、まんべんなく一様に発光することはなく、場所によ  
って発光の程度にむらがあった。

「正荷電 ACF」と「負荷電 ACF」を比較すると、次の通りである。

エリア 1 の放電電流は、「正荷電 ACF」が「負荷電 ACF」の 2.8 倍であ  
った。(  $56 \mu\text{A} \div 20 \mu\text{A}$  )

エリア 2 の放電電流は、「正荷電 ACF」が「負荷電 ACF」の 2.3 倍であ  
った。(  $93 \mu\text{A} \div 40 \mu\text{A}$  )

全放電電流は、「正荷電 ACF」が「負荷電 ACF」の 2.5 倍であった。  
(  $149 \mu\text{A} \div 60 \mu\text{A}$  )

エリア A では、「正荷電 ACF」も「負荷電 ACF」もいずれも発光しない。

エリア B では、「負荷電 ACF」の発光点数が「正荷電 ACF」の 2 倍であり、  
全ての中で最多の 10 点/cm<sup>2</sup>であった。

エリア C とエリア D では、「正荷電 ACF」の発光点数が「負荷電 ACF」の 10  
倍の 5 点/cm<sup>2</sup>であった。

全エリアでは、「正荷電 ACF」の発光点数が「負荷電 ACF」の 2.2 倍の 400  
点/cm<sup>2</sup>であった。

以上から、「正荷電 ACF」の場合は、接地極板の ACF からの負放電が強く、こ  
れが放電電流の増大、ひいては消費電力の増大を招く原因となっていると考える。  
(トゲからの正コロナ放電は、十分でないものと思われる。)

一方、「負荷電 ACF」の場合、接地極板の ACF からの正放電が弱い。ACF が毛羽  
立つことによる Gap 長(荷電極板と接地極板との距離)の短縮化が、-6.5kV と

いう電圧でも、トゲからの負コロナ放電を十分に促進させ、低消費電力で高い集塵効率を達成させる要因となっているものと考えられる。

#### 4.5 結論

NO<sub>x</sub> とオゾンの生成量を最小限にしながら、低消費電力で集塵効率を高めるための、沿道大気浄化用電気集塵装置の実験を行った。電気集塵装置の接地極板には活性炭繊維（ACF）の不織布を貼り付けた。ACFの使用は、目的に対し有効であることが証明された。実機への適用に向けては、耐久性の検証を含めた更なる検証が必要である。得られた内容をまとめると以下の通りである。

- (1) 「正荷電で接地極板に ACF を設ける場合」、トゲから正コロナ放電し、毛羽立った ACF 繊維の先端から負コロナ放電が発生し、これらが共存した。放電電流は、正荷電で接地極板に ACF が無い場合と比べて、約 15 倍に増加した。
- (2) 「負荷電で接地極板に ACF を設ける場合」の場合、トゲから負コロナ放電し、毛羽立った ACF 繊維の先端から正コロナ放電が発生し、これらが共存した。放電電流は、負荷電で接地極板に ACF が無い場合と比べて、約 2 倍に増加した。ACF が存在すると、集塵効率 80%を得るための消費電力は、他の実験ケースの約半分であった。全実験ケースの中で NO<sub>x</sub> 増加量が最も小さかった。
- (3) 全実験ケースにおいて、ESP 前後で増加した NO<sub>x</sub> は全て NO<sub>2</sub> であり、NO は検出されなかった。
- (4) 「正荷電」におけるオゾンの増減傾向と NO<sub>x</sub> の増減傾向は、類似する特性を示した。これは、オゾンのみならず NO<sub>x</sub> の生成も放電形態に依存しているためと考えられる。
- (5) 「正荷電 ACF」では、4 つの実験ケースの中でオゾン増加量が最も小さかった。

#### 4章の参考文献

- 1) 稲葉力,宮崎啓一,伊藤忠彦,武井正孝：土木技術，58，5(2003)p23
- 2) 美馬徹,佐竹英樹：土壌を用いた大気浄化システム EAP，産業機械，588(1999)p20
- 3) 山口修一：土壌による大気浄化システムの NO<sub>x</sub>、SPM 除去性能に関する研究，ハザマ研究年報，(2002)p77
- 4) 原美由紀：川崎市公害研究所年報，28，12(2001)p5
- 5) 高見勝重：大阪府における高濃度汚染対策(環境浄化技術研究開発への期待とその展望)，大気環境学会年会講演要旨集，40，(1999)p240
- 6) 小柳聡，樋口雄一，伊藤雅子，副島啓道：土壌通気による汚染大気中の NO<sub>x</sub> 浄化技術に関する研究，大成建設技術センター報、37(2004)p41-1-
- 7) 竹内浄,井上俊明：テープろ紙を用いた川崎市における SPM 高濃度時の無機粒子の二次生成に関する研究，大気環境学会誌，42，4(2007)p209
- 8) 環境再生保全機構：環境改善に関する調査研究ダイジェスト集，環境再生保全機構，(2008)p41
- 9) 環境再生保全機構：平成 17 年度環境改善に関する調査研究成果集，環境再生保全機構，(2006)p27
- 10) P.Martinez,D.K.Brandvold：Laboratory and field measurement of NO<sub>x</sub> produced from corona discharge，Atmospheric Environment，30，24(1996)p4177
- 11) K.Nashimoto：The effect of electrode materials on O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> emissions by corona discharge，Journal of Imaging Science，32，5(1988)p205
- 12) 古橋拓也，藤田洋司：平板突起電極と平板電極間のコロナ放電によるオゾン生成特性，静電気学会誌，30，3(2006)p146
- 13) 柳下大樹，高木康裕，江原由泰，端慶覧章朝，河野良宏，安本浩二：電気集じん装置における放電電極形状改善による発生オゾンの低減，電気学会プラズマ研究会資料 PST-06-35(2006)p1
- 14) 片谷篤史,細野洋,村田光,水野彰：電気集塵装置からのオゾン発生の抑制技術，静電気学会誌,32,5(2008)p222
- 15) 環境再生保全機構：平成 16 年度環境改善に関する調査研究成果集，環境再生保全機構，12(2005)p3
- 16) A.Yehia,A.Mizuno：Silver discharge electrode for suppression of ozone generation in positive dc corona，Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference，40<sup>th</sup>3(2005)p1828
- 17) B.Sung,A.Aly,S.Lee,高島和則,桂進司,水野彰：静電植毛電極を用いた電気集じん装置におけるサブミクロン粒子の捕集効果，静電気学会誌,30,2(2006)p89
- 18) F.Coppens,R.Berton,A.B.Clergerie：Theoretical estimate of NO<sub>x</sub>

production in lighting corona , Journal of geophysical reserch , vol.103  
no.D9(May 1998)p10,769-10,785

19)川口修平 , 林信哉 , 山部長兵衛 , 馬場誠二 : 沿面放電型オゾナイザにおける  
NOx 生成の抑制 , Journal of IAPS , vol.12(Dec. 2004)p131

20) 細井克彦 , 伊藤泰郎 , 江原由泰 , 高橋武男 , 端慶覧章朝 , 河野良宏 , 安本浩  
二 : 光触媒を用いた無声放電型電気集じん装置による NOx 処理 , 電気学会放電研  
究会資料 ED-03-133(2003)p57

21)水野彰 : 静電気技術の空気清浄への応用 , 静電気学会誌,29,5(2005)p237

## 5章 トゲ付平板によるイオン風の発生技術

### ( Generation of Ionic Wind by Using Parallel Located Flat Plate )

Abstract: Instead of conventional fans with rotating blades, ionic wind generators have been utilized in the various industrial fields. It is naturally important for an ionic wind generator to have its compactness and its less power consumption. Although many types of ionic wind generators have been reported, we have noticed and chosen a method of parallel located flat plates with spikes. We examined how the position and location of spikes affects its ionic wind velocity and its power consumption. As a result, it is clarified that the positive discharge has the best performance on power consumption and the negative discharge enables the fastest velocity.

#### 5.1 序論

最近，従来からの機械式の回転翼を有するファンに代わり，気体中の放電現象を利用したイオン風発生装置が，送風・冷却などの各産業分野で利用されている．イオン風発生装置に関する報告は幾つかある．例えば，針電極や放電線と，これらに対向する金網や金属平板の間に高電圧を印加する方式<sup>1-5,9-15)</sup>，アクリル管に直交する太さの異なる2本の棒電極の間に高電圧を印加する方式<sup>6)</sup>や「八」の字型に配置した2枚の金属板間の放電線に高電圧を印加する方式<sup>7,16,17)</sup>などが報告されている．また，平行平板と距離を隔てて対向するトゲ電極板との間に高電圧を印加する概念が特許<sup>8)</sup>として公開されている．この特許では，トゲの先端の方向にイオン風が吹くと報告されているが，得られた風速や極板寸法などの数値的記述が無いので，諸特性の詳細は不明である．

トゲ電極板と接地平板を交互に平行に配置した構造は，電気集塵装置の荷電部に広く採用されている．しかし，この構造におけるイオン風の諸特性は，殆ど報告されていない．著者は，この構造でイオン風を効率的に発生することが出来れば，機械式回転翼によるファンを用いることなく電気集塵装置への通風が可能になり，通風ファンを用いない電気集塵装置が実現できるのではないかと考えた．また送風装置への応用が可能になるのではないかと考えた．ここでは，トゲ電極板と接地平板を交互に配置した構造における，イオン風発生装置の風速特性等を把握することを目的とした．

#### 5.2 実験手順

イオン風発生装置の基本的な構成を図5.1に示す．トゲ電極板と，接地平板を交互に配置し，電極間に直流の高電圧を印加する．また，トゲ電極板と接地平板の枚数を増やせば，イオン風が吐出される面積を自在に増やせるので，送風装置としての応用範囲が広がる．前記特許により，イオン風によって通風される風

の向きは、トゲの先端の向きと同じく、実線の太い矢印の方向になると予想した。

本実験で用いる接地平板とトゲ電極板の外形を図 5.2 に示す。材質は SUS304 で板厚 0.4t である。トゲ単体の形状は二等辺三角形、トゲの先端角度は 30 度、溝からトゲ先端までの高さは 10mm、隣り合うトゲ同士の間隔は 12mm である。一列中に存在するトゲの数は 7 つに統一した。

本実験で用いる実験装置を図 5.3 に示す。アクリル製の主ダクトはイオン風の発生部である。主ダクト内面の上部と下部には、5mm 間隔で幅 0.9mm の溝が彫ってある。従って、接地板とトゲ電極板を、様々な極板間隔（極間）で、この溝に挿入配列することが可能である。

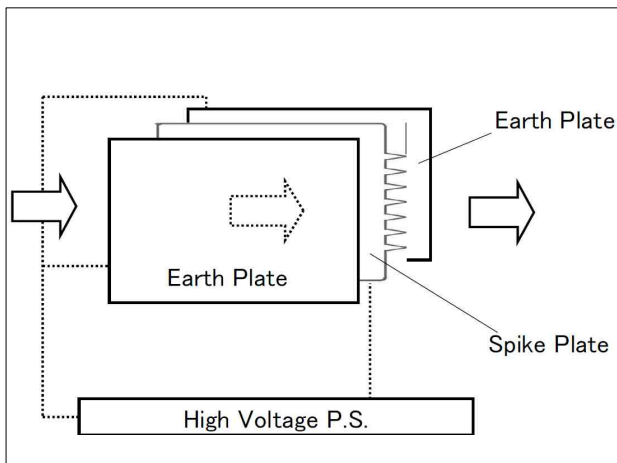


図 5.1 イオン風発生器

Fig. 5.1 Ionic wind generator

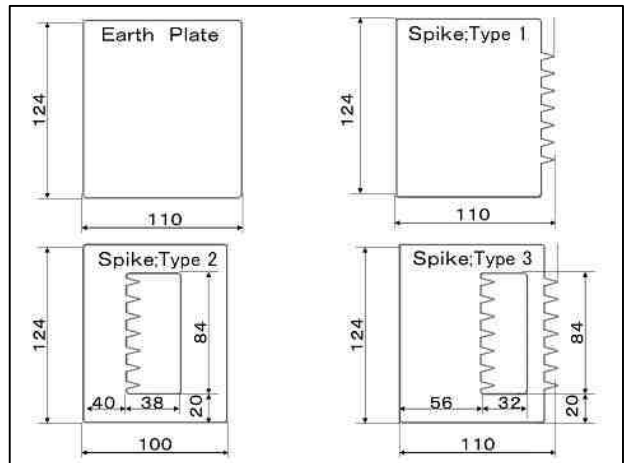


図 5.2 接地平板とトゲ電極板の外形図

Fig. 5.2 Earth plate and spike plate.

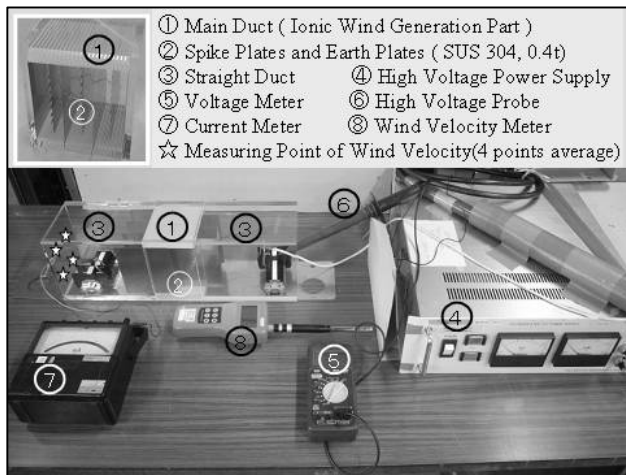


図 5.3 実験装置

Fig. 5.3 Test equipment.

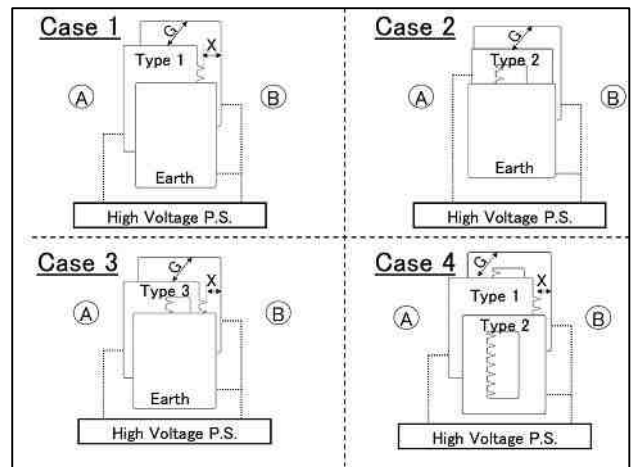


図 5.4 実験の 4 ケース

Fig. 5.4 Four cases for tests.

直管ダクトは 2 個あり、主ダクトの前後に設けて、風の流れを整流する。直管ダクトの吸込口部の断面を、十文字の均等な面積で四分割し、これら各四角形の中心点にて、熱線風速計を用いて風速を測った。四点の平均値をその条件での風速値とした。高圧電源は直流の正または負の電圧出力が可能なものである。



この電源からの電圧をトゲ電極板と接地平板間に印加した。印加電圧を徐々に上昇させ、風速と印加電圧値・放電電流値を記録した。印加電圧の上昇が限界に達しスパークが発生した時点で、その測定を終了した。また、印加電圧値と放電電流値の積を消費電力値とした。上記以外の実験装置の仕様を表 5.1 に記す。

実験は図 5.4 に示す通り、4 ケースのトゲ電極板の形状にて行った。トゲ電極板として、ケース 1 では図 5.2 のタイプ 1 (端部にトゲを配列) を用い、ケース 2 ではタイプ 2 (中央部にトゲを配列) を用い、ケース 3 ではタイプ 3 (中央部と端部にトゲを配列) を用いた。ケース 4 については接地平板を用いずにタイプ 1 とタイプ 2 の電極板を交互に配置した。

各ケースとも、隣り合う極板の間隔 (極間 G) は 10mm, 15mm, 20mm である。ケース 1 からケース 3 については、正負両方の高電圧を印加した。トゲ電極板に印加する電圧の極性により正放電, 負放電とした。ケース 4 についてはタイプ 1 の電極板に負電圧を印加して負放電させ, タイプ 2 の電極板からは正放電させた。(正放電と負放電を同時に発生させた。)

また、電極板の端部にあるトゲ突起の先端が隣接する接地板の端部から何 mm 凹んだ位置にあるのかを重視し、この水平方向のトゲ電極位置を、X [mm] で表すことにした。

表 5.1 実験装置の仕様

Table 5.1 Specifications on experiments.

Items	Details
Main duct	W 121, H 120, L 100 [mm] (Inside)
Straight duct	W 121, H 140, L 200 [mm] (Inside)
High voltage power supply	Model-502 (Pulse Electric Engineering) Max. output ; DC $\pm$ 25kV, 20mA
Voltage meter	Digital multi meter type73303 (Yokogawa)
Probe	Ratio;1/1000 (FLUKE), For high voltage
Current meter	Type2007(Yokogawa);range;1.0mA 3.0mA or Type2011(Yokogawa);range 10mA
Wind velocity meter	Climomaster MODEL6531 (Kanomax) Range; 0.10-30.0 m/s, Mode;1 sec. measuring & 10 times ave.

### 5.3 結果と考察

#### 5.3.1 ケース 1 (図 5.2 のタイプ 1 と接地平板)

印加電圧とイオン風の風速の関係を図 5.5 と図 5.6 に示す。図 5.5 は正放電, 図 5.6 は負放電の場合である。両図の中の「G」に続く数字は、極間[mm]を示し

ており，10，15，20mm の3種類とした．各グラフのプロットの注記の「X」に続く数値は，電極位置 X [mm]を示しており，90，50，30，15，8，0mm（6ケース）について測定した．

全ての場合で，図 5.4 における A 点から B 点の方向（即ちトゲの先端が向く方向）に，イオン風が吹いた．（X = 0 mm の場合，風速は 0.1m/s 未満であった．）印加電圧の上昇とともに風速は増加してゆくが，印加電圧が高くなると，増加傾向が頭打ちになる場合や，逆に風速が減少する場合があった．印加電圧が上昇し，スパークが発生した時点で，電圧の印加を停止した．

X = 50 mm の時の G10 と G15，および X = 90 mm の時の G10 と G15 において，風速値が最大となった．約 0.95m/s であった．いずれも負放電であった．

図 5.5 と図 5.6 の6つのグラフに共通することは，X が大きくなるに従って，同電圧で得られる風速が増加することである．このことから，トゲの先端方向の空間に，接地平板がより多く存在することが，高風速化に必要な条件であると考えられる．逆に言えば，トゲの先端と反対方向の空間に存在する接地平板は，高風速化にあまり貢献していないと考えられる．しかしながら，X の値が大き目の X = 50 mm の場合と，最大の X = 90 mm の場合では，ほぼ同じ風速特性を示す．即ち，印加電圧が同じ場合，X を 50mm 以上で変化させても，風速は飽和すると考えられる．

また，図 5.5 と図 5.6 に共通していえることは，X が 30mm から 90mm の間のある場合において，印加電圧が高い領域で風速が減少する傾向があることである．この現象は，参考文献 1) から 6) のいずれにおいても報告されていない．

この現象の理由を考える．表 5.2 は，それぞれの G の値において，X が 00 mm，08 mm，15 mm の A グループ（X が小）と，30 mm，50 mm，90 mm の B グループ（X が大）に分け，最大印加電圧 [kV]（各グループの3種類の X 値における最大印加電圧の平均値）を示したものである．B グループの方が，A グループよりも高い電圧を印加できることが分かる．また，表中で下線のある数値は，印加電圧の上昇とともに，（ある電圧領域で）風速の低下を示した場合である．B グループに，風速低下の現象が集中して発生していることが分かる．これらの結果から，X が大きくなると，よりスパークが発生しにくくなり，印加電圧を上げることができると考えられる．即ち，X が小さいと，トゲ近傍の正（または負）の空間電荷群と，接地平板端近傍の負（または正）の空間電荷群の距離が，近づくので，スパークが発生しやすくなる．よって電圧の上昇が困難になる．逆に X が大きくなると，両空間電荷群の距離が離れるので，スパークの発生確率が減ると考えられる．そして，X が大きい時に，接地平板の端からトゲに向かって，逆向きのイオン風が吹きやすくなる．これが，風速現象の原因ではないかと考える．（尚，参考までに，この風速減少の領域にあるとき，放電空間から顕著な騒音が聞こえた事実を報告する．）

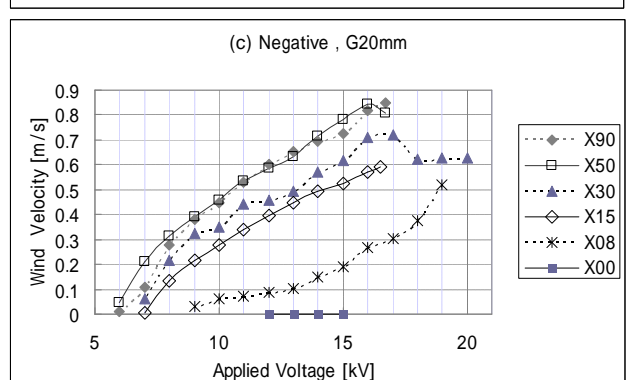
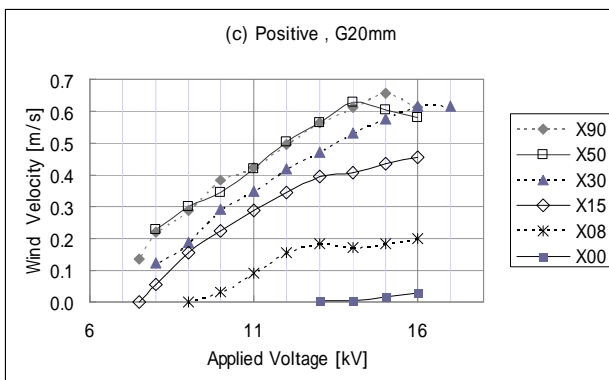
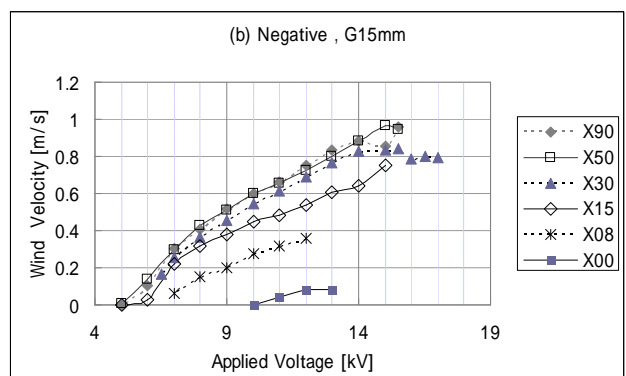
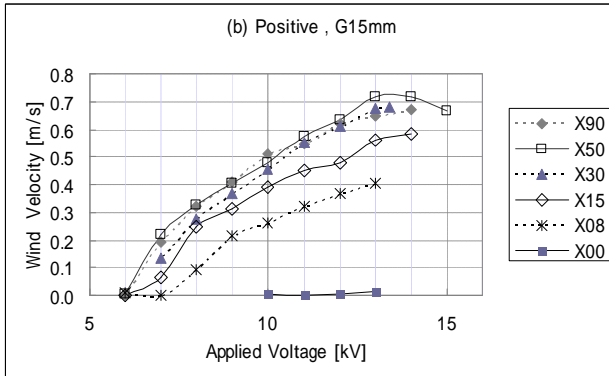
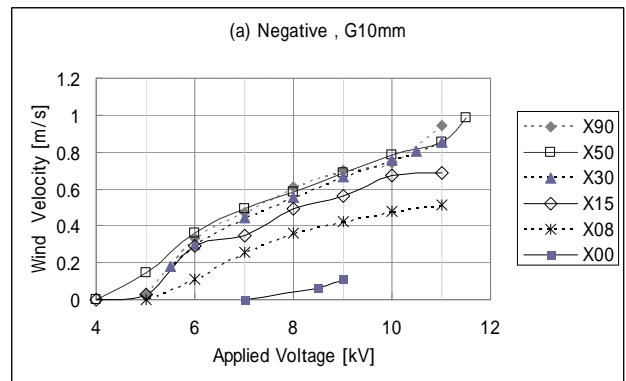
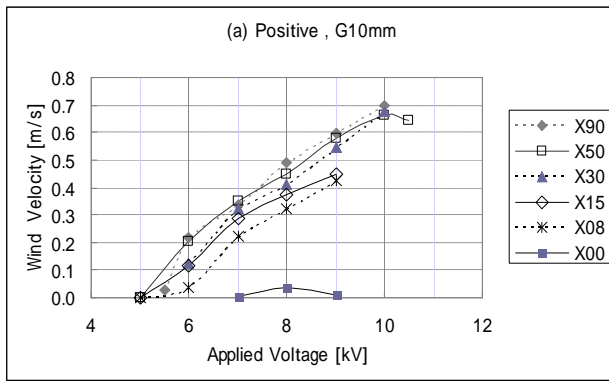


図 5.5 電圧と風速 (ケース1 正放電)

Fig. 5.5 Voltage versus wind velocity

(Case 1 positive discharge)

図 5.6 電圧と風速 (ケース1 負放電)

Fig. 5.6 Voltage versus wind velocity

(Case 1 negative discharge)

次に電流と風速減少の関係を考察する。図 5.7 は、 $X = 50 \text{ mm}$  の時の、印加電圧と電流の関係である。プロット説明符号の「G」に続く数値は極間を示し、「G」の前の+または-の符号は、正・負放電の別を示す。図 5.7 のプロット+G10, +G15, +G20, -G15, -G20 は、図 5.5 および図 5.6 の  $X = 50 \text{ mm}$  において、風速減少が現れた 5 つのケースである。

図 5.7 の全てのプロットにおいて、印加電圧の上昇とともに電流値の増加が認められ、風速が減少する電圧の領域においても、電流値は増加していることが分かる。このことは、風速減少領域における電圧の増加が、電流の増加をもたらすにも関わらず、風速減少を招いていることを示している。この点からも、高電界

となる接地平板の端部からトゲに向かって、逆向きのイオン風が吹くことが覗える。

表 5.2 . 最大印加電圧

Table 5.2 Maximum applied voltage.

X [mm]		Positive [kV]			Negative [kV]		
		G10	G15	G20	G10	G15	G20
A group	0	9.3	13.3	16.3	10.3	13.3	16.8
	8						
	15						
B group	30	<u>10.3</u>	<u>14.1</u>	<u>16.3</u>	11.3	<u>16.0</u>	<u>17.8</u>
	50						
	90						

Remark ; The numbers with an under bar showed the range of decreasing velocity.

表 5.3 トゲ電極板の枚数 N

Table 5.3 Quantity N of spike plates.

	G10	G15	G20
Earth plate (N+1)	7	5	4
Spike plate (N)	6	4	3

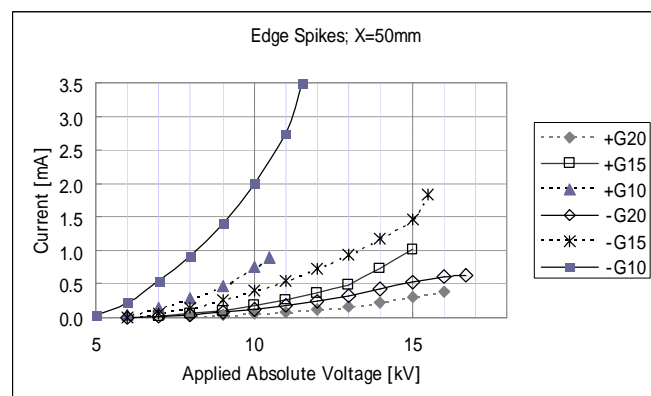


図 5.7 電圧と電流 ( ケース 1 )

Fig. 5.7 Voltage versus current (Case 1)

図 5.7 を見ると、同じ G ・ 同じ絶対値電圧の条件下では、正放電よりも負放電の方が大電流を流せることが分る。表 5.2 から正放電よりも負放電の方が、最大印加電圧が大きいことが分る。これらのことから、正放電よりも負放電の方が、イオン風速を速くすることができると思われる。

図 5.8 と図 5.9 に、X = 50 mm の時の消費電力と風速の関係を示し、図 5.8 は正放電、図 5.9 は負放電の特性である。

図 5.8 の正放電の場合、同一消費電力で比較すると、最も風速が大きいのは、G20 であり、次に G15, G10 の順 ( G が大きい順 ) となっている。この理由を考える。図 5.3 のメインダクトの幅は 121 mm であり、この寸法の中で、図 5.2 の接地平板とトゲ電極板 ( Type 1 ) を交互に配列し、3 種類の G を達成している。表 5.3 に、各 G に対する接地平板とトゲ電極板の枚数を示す。G20 は、板が 7 枚 ( 4 枚 + 3 枚 ) であり、他の G より少ない。イオン風通風時の流体抵抗が小さい

ことが、同一消費電力で、G20の風速が最速となる理由のひとつになると考えられる。

図5.9の負放電の場合も、同一消費電力で比較すると、風速が大きい順と、Gが大きい順が一致した。

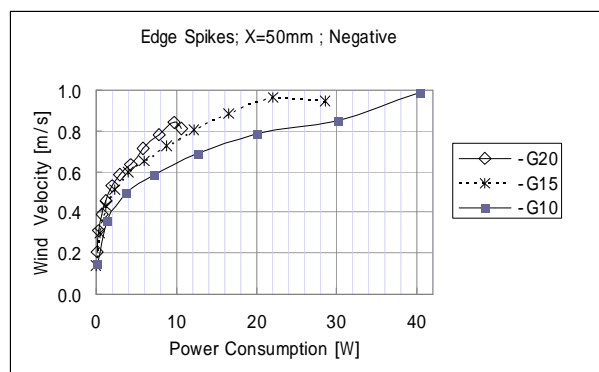
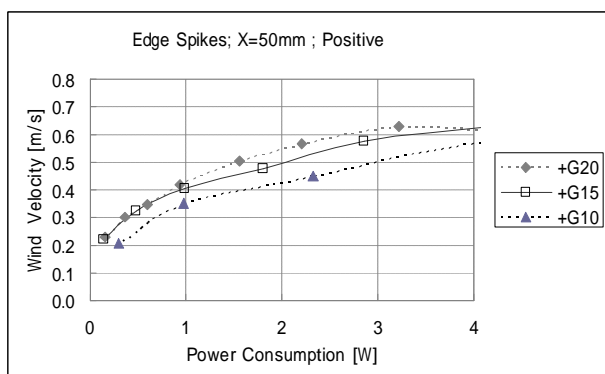


図 5.8 消費電力と風速 (ケース 1 正放電) 図 5.9 消費電力と風速 (ケース 1 負放電)

Fig.5.8 Power consumption vs. wind velocity Fig.5.9 Power consumption vs. wind velocity  
(Case 1 positive) (Case 1 negative)

### 5.3.2 ケース 2 (図 5.2 のタイプ 2 と接地平板)

図 5.2 のタイプ 2 のトゲは、板の端部ではなく、板の中央部に配置してある。但しトゲは、ケース 1 の  $X = 50 \text{ mm}$  と同じ位置になるように配置した。実験結果を図 5.10 に示す。

端部のトゲ (ケース 1) に比べ、中央部のトゲ (ケース 2) の場合、風速は全てにおいて数割低下した。中央部のトゲは、高風速化に貢献しないことが判明した。追加実験を行い、その理由を探ることとした。

イオン風速は電流密度の平方根に比例することが、参考文献 4 などにより知られている。そこで、ケース 1 とケース 2 の両者において、接地平板の各部の電流密度を計測することにより、各部のイオン風の強さを把握するという追加実験を行った。接地平板の母材を絶縁性の樹脂板とし、その板面上にアルミニウムテープを等間隔で貼り、各部の電流値を計測した。図 5.11 に外観写真を示す。図 5.12 と図 5.13 は両ケースの、具体的位置関係などの条件を示す。接地平板にはエリア 1 からエリア 9 迄の独立した 9 つのエリアが存在している。トゲ電極板には正負それぞれ  $11 \text{ kV}$  を印加した。各エリアの電流値を電流密度に換算してまとめた結果を、図 5.14 と図 5.15 に示す。(使用した極板は、トゲ電極板各ケース 1 枚、アルミテープ付接地平板 1 枚、図 5.2 に示す金属製の接地平板 1 枚である。)

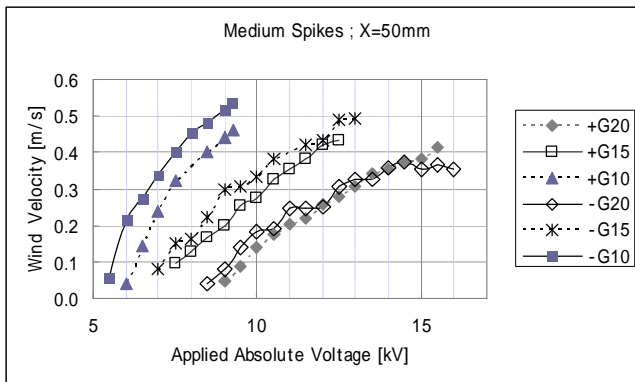


図 5.10 電圧と風速 (ケース 2)

Fig. 5.10 Voltage versus wind velocity (Case 2)

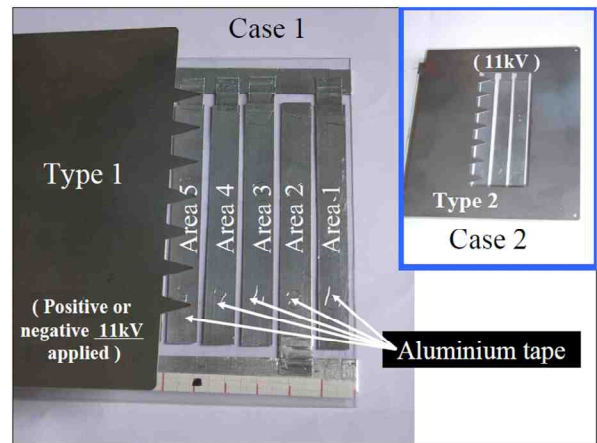


図 5.11 追加実験装置

Fig. 5.11 Additional test equipment

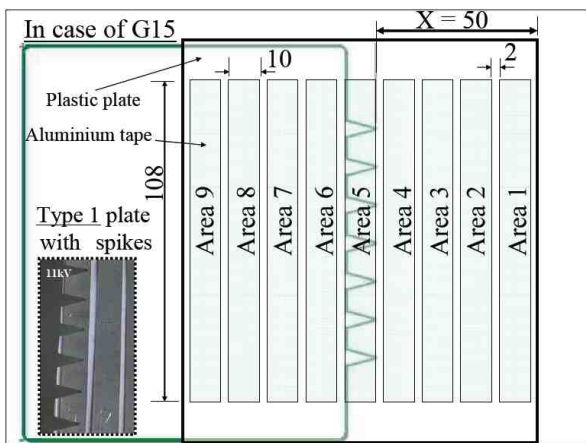


図 5.12 ケース 1 の追加実験条件

Fig. 5.12 Test condition for Case 1

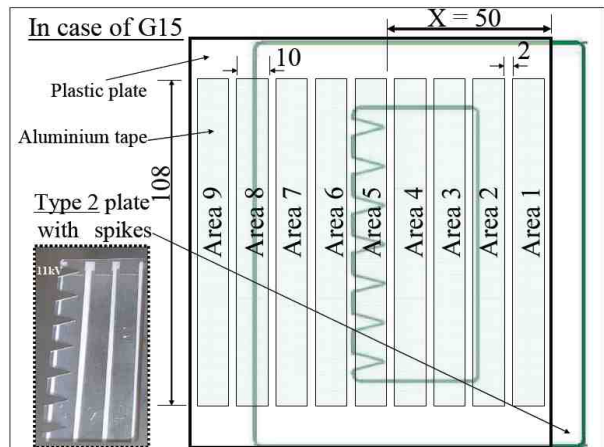


図 5.13 ケース 2 の追加実験条件

Fig. 5.13 Test condition for Case 2

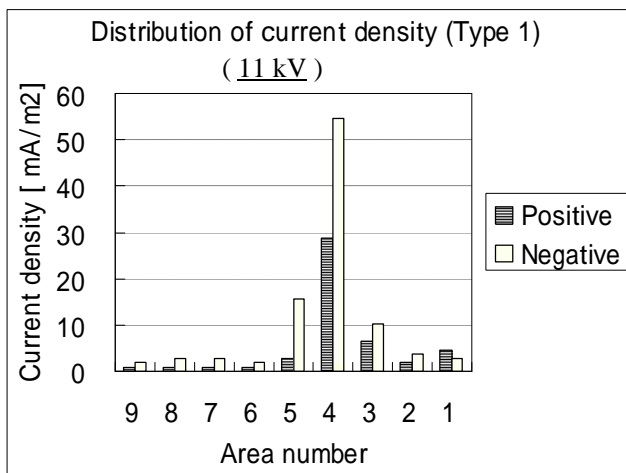


図 5.14 ケース 1 の電流密度分布

Fig. 5.14 Current distribution of Case 1

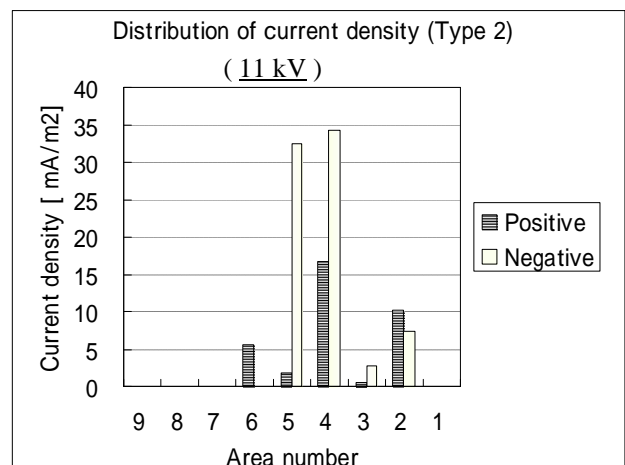


図 5.15 ケース 2 の電流密度分布

Fig. 5.15 Current distribution of Case 2

正放電での、ケース1とケース2の比較を行うと、次の通りとなる。

エリア4において電流密度が最大となる。ただし、ケース1では  $29\text{mA}/\text{m}^2$ 、ケース2では  $17\text{mA}/\text{m}^2$  であり、ケース1の方が大きい。よって風速もケース1の方が大きい。

エリア1からエリア9迄の全電流に対するエリア4の電流値比率が、ケース1では60%、ケース2では48%である。よってケース2の方が、エリア4に集中せずに分散している。ケース2のエリア2に、比較的大きい電流密度値  $10\text{mA}/\text{m}^2$  が現れているが、これはタイプ2の電極板の直線エッジ部からの放電によるものである。

負放電での、ケース1とケース2の比較を行うと、次の通りとなる。

エリア4において電流密度が最大となる。ただし、ケース1では  $55\text{mA}/\text{m}^2$ 、ケース2では  $34\text{mA}/\text{m}^2$  であり、ケース1の方が大きい。よって風速もケース1の方が大きい。

エリア1からエリア9迄の全電流に対するエリア4の電流値比率が、ケース1では57%、ケース2では45%である。よってケース2の方が、エリア4に集中せずに分散している。ケース2のエリア2に、比較的大きい電流密度値  $7\text{mA}/\text{m}^2$  が現れているが、これはタイプ2の電極板の直線エッジ部からの放電によるものである。

ケース2のエリア5に、極めて大きい電流密度値  $32\text{mA}/\text{m}^2$  が現れているが、これはタイプ2の電極板のトゲ根本部からの放電も影響しているものと考えられる。

以上により、端部のトゲ（ケース1）に比べ、中央部のトゲ（ケース2）は、高風速化に貢献しない理由が判明した。このことは、正放電、負放電の両者に共通して言える。

また、ケース1とケース2において共通する顕著な点を挙げる。トゲ直下投影部のエリア5では、正放電の場合、殆ど放電電流が流れないのに、負放電の場合、比較的大きな電流が流れるという点である。これは、負放電の場合、トゲの先端部以外のトゲ近傍部分からも比較的多く放電することが一要因として考えられる。

### 5.3.3 ケース3（図5.2のタイプ3と接地平板）

図5.2のタイプ3のトゲ電極板は、端部のトゲと中央部のトゲの両者を備えたものである。タイプ1とタイプ2の特徴をもつ形状で、トゲの数が2倍に増えている。

$X = 40\text{ mm}$  の条件で実験を行った。図5.16に電圧と風速の関係を示す。最高風速は負放電の極間10mmの時に  $1.1\text{m}/\text{s}$  であった。トゲの数を増やすことで、放電電流が増加したので、高い風速を得られたものと考えられる。

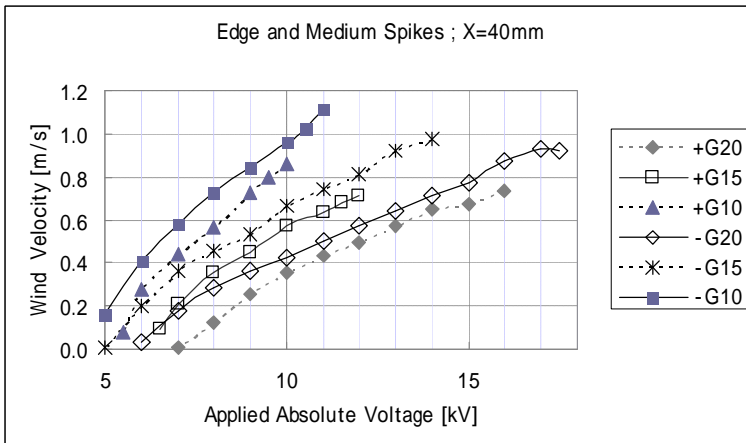


図 5.16 電圧と風速 (ケース 3)

Fig. 5.16 Voltage versus wind velocity (Case 3)

#### 5.3.4 ケース 4 (図 5.2 のタイプ 1 とタイプ 2 の併用)

接地平板を用いずに,  $N$  枚のタイプ 1 と,  $N + 1$  枚のタイプ 2 を交互に配置した. タイプ 1 から負放電を, タイプ 2 から正放電を同時に発生させた. (タイプ 1 またはタイプ 2 と比べて, トゲの数が 2 倍に増えている.)

$X = 20 \text{ mm}$  の条件で実験を行い, 結果を図 5.17 に示す. 最高風速は負放電の G10 の時,  $1.2 \text{ m/s}$  であった. トゲの数が増え, また, 全ての金属板 ( $2N + 1$  枚) が, イオン風の発生源となるので, 高い風速が得られたものと考えられる.

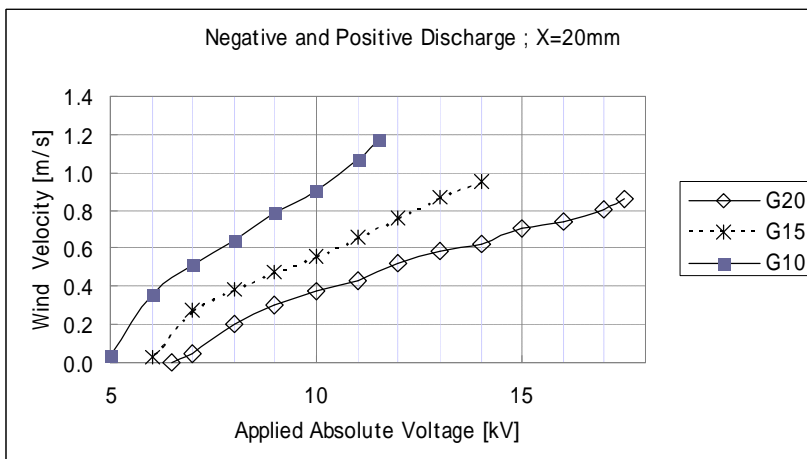


図 5.17 電圧と風速 (ケース 4)

Fig. 5.17 Voltage versus wind velocity (Case 4)



#### 5.4 結論

種々のトゲ電極板と接地平板を平行に配置し，極間  $G$  [mm] とトゲ電極の位置  $X$  [mm] を変化させ，直流高電圧を印加し，イオン風速を評価した．得られた内容をまとめると，以下の通りである．

- 1) イオン風の向きは正放電でも負放電でも，トゲの先端が向く方向である．
- 2) トゲがトゲ電極板の端部のみに存在する場合，隣接する接地平板端部からの凹み距離が長くなるに従い，風速は速くなり，飽和する．
- 3) トゲがトゲ電極板の端部のみに存在する場合，印加電圧の増加に伴い，電流は増加するが，風速が減少する場合がある．
- 4) 正放電よりも負放電のほうが高風速を得やすい．
- 5) 同一消費電力の比較では，極間が大きいほど風速が速い．
- 6) トゲ電極板には，内面にトゲを設けるよりも，端部にトゲを設けるほうが，高風速を得やすい．
- 7) トゲ電極板の端部の他に，内面にもトゲを設け，トゲの総数を増やすことによって，風速をより速くできる．
- 8) 接地板を用いずに，トゲの位置を離れた2種類のトゲ電極板を交互に配置することによって，高風速を得ることができる．

## 5章の参考文献

- 1) 前原弘典, 足立宣良: 電気集じん器のコロナ放電電界におけるイオン風についての研究(第一報), 山口大学工学部研究報告, Vol.20, No.3(1970)p385-392
- 2) 高城実, 川崎元之, 足立宣良, 平等電界中におけるイオン風速の特性: 静電気学会誌, 7, 6(1983)p408-414
- 3) 大久保利一, 山口哲也, 野本幸治, 足立宣良: 針対平板電極におけるコロナ電流密度分布とイオン風の特性, 大分大学工学部研究報告, No.14(1986)p63-68
- 4) K. Tanoue, H. Taniguchi, H. Masuda: Experimental study on both ionic wind and re-suspension of particles under unequal electrostatic field, Advanced Power Technology, Vol.17, No.1(2006)p69-83
- 5) T.Yamamoto, M.Okuda, M.Ohkubo: Three-dimensional ionic wind and electrostatic precipitator, the IEEE industry applications conference, vol.37<sup>th</sup> no.vol.2(2002)p1397
- 6) N. Takeuchi, K. Yasuoka, J. S. Chang: The effect of discharge wire diameter on the flow characteristics of wire-rod type electrohydrodynamic gas pump, 6<sup>th</sup> Conference of the French Electrostatics Society, (July 2008)p410-415
- 7) M. Kocik, J. Podlinski, J. Mizeraczyk, K. Urashima, J. S. Chang: 6<sup>th</sup> Conference of the French Electrostatics Society, (July 2008)p422-427
- 8) 豊田弘一: 送風装置, 特開 2009-74766
- 9) T.Yamamoto, L.E.Sparks: Numerical simulation of three-dimensional tuft corona and electrohydrodynamics, IEEE transactions on industry applications, vol.IA-22 no.5(Sep.&Oct. 1986)p880
- 10) T.Yamamoto, Y.Morita, H.Fujishima, M.Ohkubo: Three-dimensional EHD simulation for point corona electrostatic precipitator based on laminar and turbulent models, Journal of electrostatics, 64(2006)p628
- 11) T.Yamamoto, H.R.Velkoff: Electrohydrodynamics in an electrostatic precipitator, Journal of fluid mechanism, vol.108(1980)p1
- 12) T.Yamamoto, H.R.Velkoff: Effects of turbulence and electrohydrodynamics on the performance of electrostatic precipitators, Journal of electrostatics, vol.2(1989)p11
- 13) D.Brocilo, J.Podlinski, J.S.Chang, J.Mizeraczyk, R.D.Findlay: Electrode geometry effects on the collection efficiency of submicron and ultra-fine dust particle in spike-plate electrostatic precipitators, Journal of physics, Conference series 142(2008)P1
- 14) J.S.Chang, J.Dekowski, J.Podlinski, D.Brocilo, K.Urashima, J.Mizeraczyk:

Electrohydrodynamic gas flow regime map in a wire-plate electrostatic precipitator under positive coronas, IEEE, 2005 annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena, (2005)p461

15) J.Podlinski, M.Kolic, J.Mizeraczyk : Measurements of EHD flow patterns in ESP with dc+pulsed voltage hybrid power supply, Journal of physics, Conference series 142(2008)012037

16) M.Kolic, J.Podlinski, A.Niewulis, J.Mizeraczyk, H.Tsubone, J.S.Chang : Particle image velocimetry measurements of wire-non-parallel plate induction fan type electrohydrodynamic gas pump, Journal of physics, Conference series 142(2008)012061

17) J.S.Chang, H.Tsubone, N.Buenconsejo Jr, J.Ueno, G.D.Harvel, J.Mizeraczyk, K.Urashima : Corona discharge and flow characteristics of wire-plate type electrohydrodynamic gas pump: ground plate convergent angle effect, 28<sup>th</sup> ICPIG, July 15-20, (2007)p1070

## 6章 結論

3つの研究テーマの各結論については、3章 3.4項、4章 4.5項と5章 5.4項に記した通りである。ここでは、3つの研究結果を、横断的に考察することを試みる。

### 6.1 オゾン生成とNO<sub>2</sub>生成

3章では、電気集塵装置からのオゾン発生量を評価した。図 3.6(b)に示すように正荷電のケースでは、消費電力の増加とともに、オゾン発生量が増加せず、かえって減少する領域が存在することが確認された。従って、有害物質であるオゾンの発生量をできるだけ抑制するためには、負荷電よりも正荷電を採用する方が良いことが明らかになった。また、4章では、電気集塵装置からのNO<sub>2</sub>発生量を評価した。図 4.10(a)に示すように、正荷電(Positive)条件下では、オゾン発生特性(図 4.11(a))と似た特性を示しながら、消費電力の増加とともに、有害物質であるNO<sub>2</sub>の発生量が減少する領域の存在を確認した。しかしながら、この正荷電のNO<sub>2</sub>発生量の減少領域においては、負荷電(Negative)のNO<sub>2</sub>発生量を上回っていた。

このことを言い換えれば、「正荷電では、オゾン発生量を抑制できるが、NO<sub>2</sub>発生量を抑制することは出来ないし、負荷電ではNO<sub>2</sub>発生量を抑制できるが、オゾン発生量を抑制することは出来ない」ということになる。ここで、オゾンもNO<sub>2</sub>も共に有害物質なので、消費電力に対する、「オゾン発生量とNO<sub>2</sub>発生量の総和」をとることを考え、これを図 6.1.1 に示す。(図 4.10 と図 4.11 を併せたものである。)

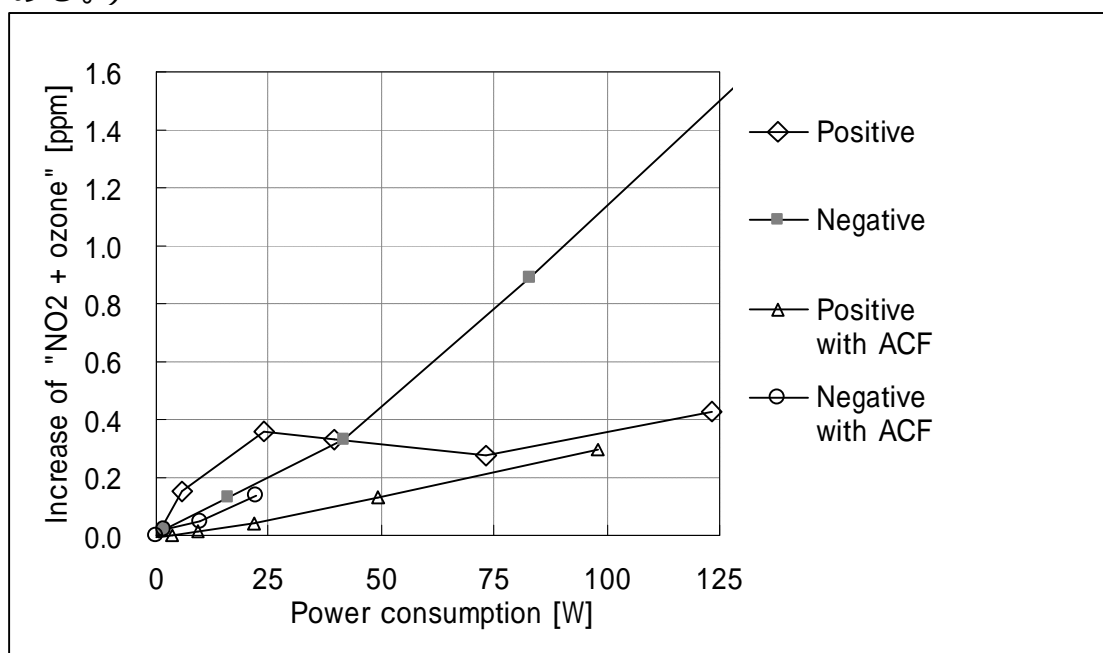


図 6.1.1 NO<sub>2</sub>とオゾンの総和の増加量

Fig. 6.1.1 Generation of "NO<sub>2</sub> + ozone"

図 6.1.1 は、図 4.11(a)「各ケースのオゾン増加量」と酷似している。このことから、全ケースにおいて、 $\text{NO}_2$  よりもオゾンの方が、その発生量が多いので、有害物質としては、 $\text{NO}_2$  よりも、オゾンの方が（量の面で）支配的になっているといえる。沿道や道路トンネルにおいて電気集塵装置を用いる場合、これらの設置環境における空気中の  $\text{NO}_x$  の成分は、半分以上が  $\text{NO}$  なので、発生したオゾンが  $\text{NO}$  と化学反応して、 $\text{NO}$  よりも有害な  $\text{NO}_2$  に変化する可能性は極めて大きい。従って、これらの設置環境で電機集塵装置を使用する場合、 $\text{NO}_2$  発生量の抑制よりも、オゾン発生量の抑制に配慮する方が、有害物質の増加を最小限に留めることができるので、より環境に配慮できるといえる。

## 6.2 イオン風速の再評価

5章では、イオン風の風速を評価し、その中で、正放電よりも負放電の方が高風速を得やすいことが判明した。4つの実験ケースのイオン風発生部の構造については、図 5.4 に示した通りである。これら4つの実験ケースのうち、負放電で極間 10mm の場合における、消費電力とイオン風速の関係を、全4ケース並列的にまとめると、図 6.2.1 が得られる。4ケースの負放電のなかで、ケース4（正放電と負放電を同時に発生させる場合）が最高風速であり、しかも消費電力効率が良いことが分かる。しかし、正負の同時放電によってなぜ消費電力効率が向上したのかは、現在のところ不明である。

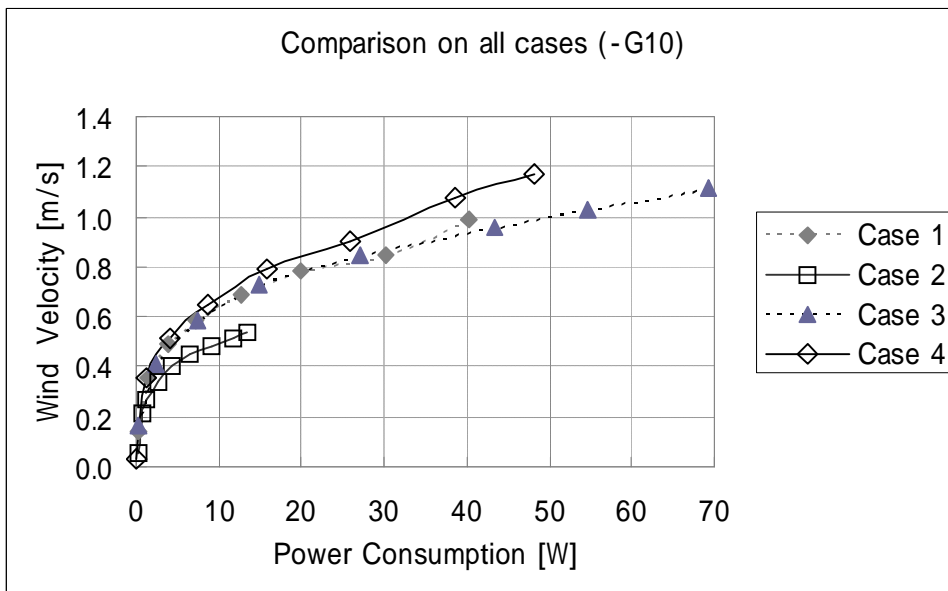


図 6.2.1 消費電力と風速

Fig. 6.2.1 Power consumption versus wind velocity

### 6.3 今後の展望

4章では、電気集塵装置の接地極板に ACF（活性炭繊維）を貼り付けて、NO<sub>x</sub>（NO<sub>2</sub>）とオゾンの生成量抑制を試みた。そして、図 6.1.1 から分かるから分かるように、正負両コロナ放電の発生条件下で、NO<sub>2</sub> とオゾンの生成量が抑制されることが明らかになった。（「負荷電 ACF」が最良で、二番目が「正荷電 ACF」。）

また、6.2 項に記した通り、正放電と負放電を同時に発生させると、イオン風の最高風速が得られ、しかも消費電力効率が良いという事実が得られた。

本研究を通じて、「正放電と負放電の共存」という条件が、今後の研究のキーポイントになるのではないかと考えるに至った。即ち、正負放電の共存を探求することにより、電気集塵装置など静電気を扱う技術を、より深耕できる可能性があるのではなかろうか。

今後、世界中で、地球温暖化の抑制に対する取組が一層強化されるであろう。また、環境に配慮して有害物質の発生を抑制し、さらには、積極的に有害物質を除去する動きがより活発になるであろう。今後、本研究を更に発展させ、低消費電力、高除去率という研究者にとっての永遠のテーマに挑み続ける所存である。

## 謝辞

本論文全般にわたり、懇切丁寧に御指導してくださいました豊橋技術科学大学の水野彰教授に、心から感謝いたします。

また、論文内容の精査時に、数々の適切な御助言を与えてくださいました豊橋技術科学大学の田中三郎教授と高島和則准教授に深く感謝いたします。

さらに、イオン風の電流密度分布の計測法や関連論文を御示しいただき、論文完成に向けて励ましてくださいました東京都市大学の山本俊昭教授に深く感謝いたします。

また、本論文の背景技術となった沿道大気を浄化する自然通風式電気集塵装置の研究に御助言・御指導をくださいました以下の方々に、深く感謝する次第でございます。

工学院大学 北林教授

早稲田大学 大聖教授

静岡県立大学 松下名誉教授、雨谷准教授

九州大学 持田教授

国立環境研究所 森口室長

独立行政法人 環境再生保全機構の関係者のみなさま

財団法人 日本品質保証機構の関係者のみなさま

川崎市環境局公害部の関係者のみなさま

また、本研究に関する実験に多大な労力を注いでくれた、パナソニックエコシステムズ(株)の細野洋君、村田光君、八幡大志君、中原健吾君および奥山照子君に、大いに感謝いたします。

また、道路トンネルの集塵・脱硝について、数々の温かい御指導をくださったパナソニックのOBの方々(故馬場輝朗博士、故石田瑞穂博士、故杉江尚治氏、橋本彰氏、三村雄次郎氏)に心から感謝いたします。

最後に、本研修に関係していただいたすべての方々に、厚く御礼申しあげます。

片谷篤史

## 研究業績

### 【査読付論文】

- (1) 片谷篤史, 細野洋, 村田光, 水野彰: “電気集塵装置からのオゾン発生の抑制技術”, 静電気学会誌, Vol.32, No.5, pp. 222-227 (2008)
- (2) Atsushi Katatani, Hiroshi Yahata, and Akira Mizuno: “Reduction of NO<sub>x</sub> Generation from Electrostatic Precipitators”, International Journal of Plasma Environmental Science and Technology, Vol.4, No.1, (2010) (掲載予定)

### 【国際学会発表】

- (1) Atsushi Katatani and Akira Mizuno,: “Reduction of Ozone Generation from Electrostatic Precipitator”, Proceedings of the 6th Conference of the French International Electrostatics Society, p.p. 351-355 (2008 Paris)