

論文

集じん電極形状における放電空間での負イオン風の挙動

川崎 元之*, 足立 宜良**

(1980年3月11日受理)

Behavior of Negative Ionic Wind in Corona Discharge Space with Various Types of Collecting Electrode

M. KAWASAKI* and T. ADACHI**

(Received March 11, 1980)

Various types of collecting electrode structures have been used to prevent re-entrainment phenomenon of dust in an electrostatic precipitator. However, the behavior of ionic wind has not been well-understood in detail for the various types of collecting electrodes. The behavior of negative ionic wind induced by negative corona discharge with the typical collecting electrodes (flat, fin, fin with rib, offset, and zigzag plate) is examined by means of Schlieren method under the normal atmospheric condition. The primary ionic wind which is induced from the discharging wire to the collecting electrode is deflected toward the direction of gas flow. Some of the secondary ionic wind caused by the collision of the primary ionic wind with the collecting electrode reverse the flow near the surface of collecting electrode. Therefore, the eddies of ionic wind are produced in the space between active and passive electrodes. It may be considered that the pressure and the eddies of ionic wind have an effect on the collection of dust particles. From the viewpoint of ionic wind, a zigzag plate and a fin plate with rib are effective type. A zigzag plate must be taken as a counterplan to prevent the positive corona discharge on the top of zigzag.

1. まえがき

電気集じん装置（以下 EP と略す）内でコロナ放電に伴って発生するイオン風の挙動については古くから関心が持たれ^{1,2)}、Deutsch³⁾は針対平板電極において針端の直下を中心とするリング状のダストフィギュアがイオン風によって作られることを実験的に示した。これまでわれわれの1人は、針対平板電極におけるイオン風速の測定結果と理論的解析結果との比較検討を行ない⁴⁾、また、線対平板電極でのイオン風の挙動について、シュリーレン装置による実験的考察⁵⁾を行なった。そして、線対平板型 EP 内でダスト粒子がイオン風作用力を受けてダスト捕集効果に影響を与えることも検討⁶⁾した。しかし、現在まで実用 EP のコロナ放電が行なわれる平均電界強

度 ($4 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5 \text{ V/m}$)において、ダスト再飛散現象対策としての集じん電極の形状⁷⁾が種々変わった場合のイオン風挙動についての報告は見あたらない。

種々の典型的な集じん電極形状における放電空間でのイオン風の挙動についての検討は、EP の電極形状の設計に有意義な指針を与えるものと考えられる。そこでわれわれは、平板電極、オフセットプレート、ジグザグプレート、フィンプレートならびにリブ付きフィンプレート（図2参照）の5種類の集じん電極形状が自由に取換えできる模擬 EP を試作し、ガス流がない場合とある場合について、両電極間に生じるイオン風の挙動をシュリーレン装置によって調べた。本論文は上記5種類の集じん電極形状における負コロナ放電特性ならびにダスト粒子を含まない気流内でのイオン風挙動についての実験的考察である。ただし、実験は大気中で行なわれた。

2. 実験装置の概要

2.1 実験回路と電極構成

図1に示す EP の実験回路において、SV は静電電圧計 ($50 \times 10^3 \text{ V}$)、A₁ は直流電流計 (10^{-6} A または 10^{-3} A)、A₂ は直流電流計 (10 A)、B はバッテリー (72 V)，

* 西日本工業大学電気工学科 (800-03 福岡県京都郡苅田町)
Department of Electrical Engineering, Nishinippon Institute of Technology, Kanda-machi, Miyakogun, Fukuoka 800-03, Japan

** 山口大学工学部電気工学科 (755 宇部市常盤台)
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Tokiwadai, Ube 755, Japan

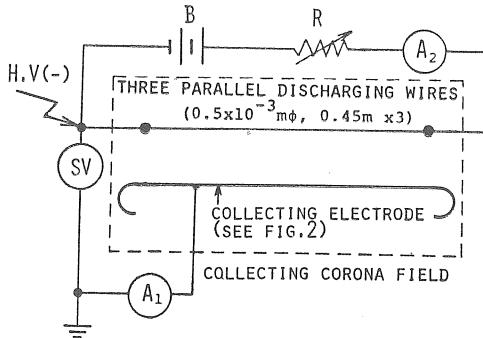


図1 実験回路

Fig. 1 Schematic diagram of experimental circuit.

Rは可変抵抗 ($0\sim 5.5\Omega$)、点線内は放電線 (3本並列)と集じん電極から構成された模擬EPである。B, R, A₂および放電線を含む閉回路は、シュリーレン法でのイオン風の観察を容易にするための放電線加熱用の付加回路で、大地と絶縁されている。図1の放電線は、イオン風の相互干渉が観察できるように3本並列に配置され、放電線と並行の方向からイオン風の挙動を調べた。

放電線径 ($0.5\times 10^{-3}\text{ m}$)、線有効長 (0.45 m)、ならびに加熱電流 ($I_h=6\text{ A}$) はイオン風の挙動の観察しやすさなどを考慮して定められたもので、無印加電圧時での放電線の加熱温度は光高温計で 907°C であった。

使用した種々の集じん電極の形状ならびに寸法を図2に示す。図2(a)に示す線対平板電極において、線に垂直方向からのイオン風の挙動考察についてはすでに報告³⁾したが、他の集じん電極形状との比較のため再度使用した。このほかに図(b)に示すオフセットプレート、(c)ジグザグプレート、(d)フィンプレート、(e)リブ付きプレートについて実験を行なった。放電線間隔Pはシュリーレン装置の凹面鏡の直径 (0.325 m) で制限され、 0.12 m である。電極間隔Sは、 $P/2S$ を一般の実用EPの条件 $0.8^3)$ に選定したので 0.075 m となった。ただし、Sは平板電極面または平板電極面上に設置した電極形状の高さの中心から放電線までの距離である。

2.2 シュリーレン法

シュリーレン法としては平行光線中で現象が観察できる2面対向法を用いた。その概略を図3に示す。図中の平行光線領域での試料配置場所Sには、図1の点線で囲まれた模擬EPを設置して、P点でイオン風の挙動観察および写真撮影を行なった。撮影条件は300ミリズーム、F 5.6, 1/500 s, フィルム ASA 400 で暗室にて撮影した。

シュリーレン法は光の屈折を利用して空気密度のわずかな違いを見いだす方法である。したがって、図3のS

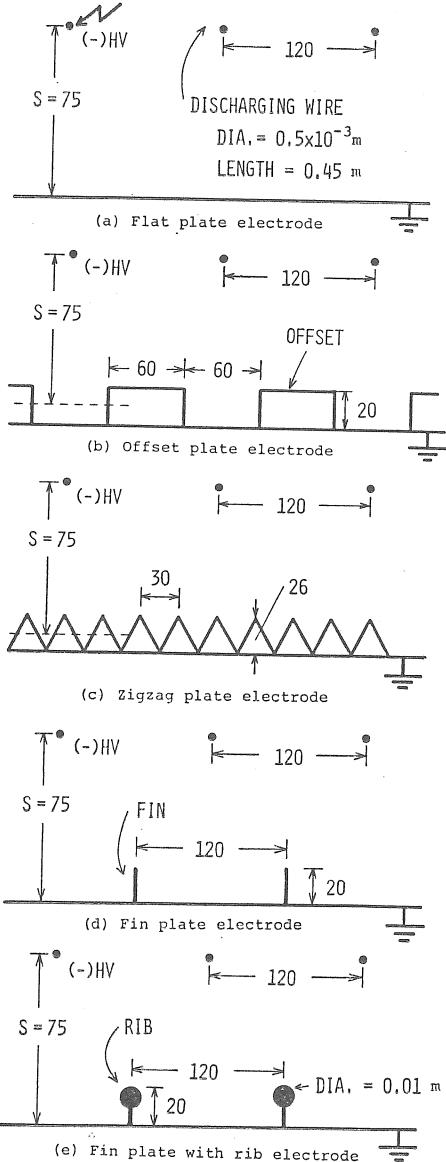


図2 集じん電極の形状 (寸法単位 mm)

Fig. 2 Various types of collecting electrode.
(Dimension in mm)

の場所でコロナ放電を生じさせても、それに伴う気流の乱れ (イオン風) を観察することは困難である。そこで放電線自体をバッテリBで加熱し、その周囲の空気を温め大気に対して空気密度差を与えることでこの目的を達する。

3. 負コロナ放電特性

イオン風の挙動と密接な関係があるコロナ放電特性を図4に示す。放電線加熱電流 $I_h=6\text{ A}$ において、放電線

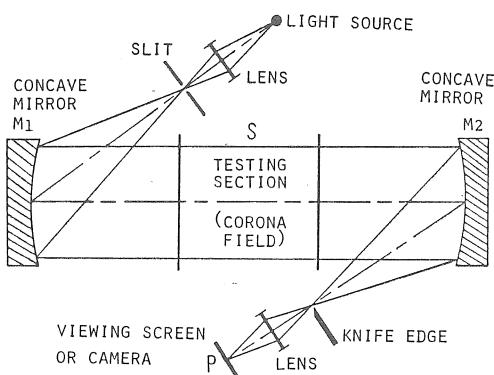


図3 シュリーレン装置の概要

Fig. 3 Schematic diagram of Schlieren apparatus.

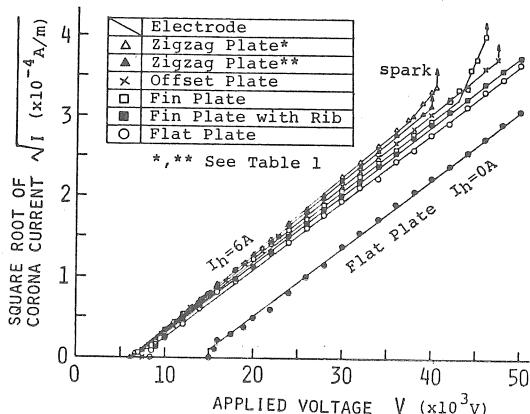


図4 集じん電極形状における負コロナ放電特性(図2参照)

Fig. 4 Characteristics of negative corona discharge for the various types of collecting electrode. (See Fig. 2)

は赤熱(初期加熱温度 907°C)されているが、コロナ開始電圧以上の印加電圧 V の上昇とともにイオン風の風速も増加し、その冷却作用によって放電線は徐々に暗赤色になり、コロナ輝点による青紫色になる。そして、コロナ放電特性も $I_h = 0$ A の場合に近づく傾向を示す。

図4は、 $I_h = 6$ A における放電線単位長さ当たりのコロナ電流 I の平方根で測定値を整理すると、 $V - \sqrt{I}$ 特性は電極の形状および放電線加熱の有無にかかわらず直線で近似される。 I_h が 0 A の場合の一例として平板電極の特性を図4の中に示した。放電線を加熱すると低い印加電圧側に $I_h = 0$ A の特性を平行移動した特性になることが特徴的である。

ジグザグプレート電極でのコロナ電流が他の電極形状に比較していちばん大きいことは、電極の三角形それぞれの頂点に電界が集中して、電界強度が大きくなるもの

表1 各電極における負コロナ開始電圧(V_c)、火花電圧(V_s)および正コロナ発生電圧(V_p)

Table 1 Negative corona onset voltage (V_c), spark voltage (V_s) and positive corona onset voltage (V_p) for the collecting electrode. (See Fig. 2)

Electrode	$V_c (\times 10^3 \text{V})$	$V_s (\times 10^3 \text{V})$	$V_p (\times 10^3 \text{V})$
Zigzag plate*	6.0	40.5	37.0
Zigzag plate**	6.0	40.0	39.0
Offset plate	7.5	47.5	—
Fin plate	6.5	46.0	43.0
Fin plate with rib	8.0	>50	—
Flat plate	8.4	>50	—

* Wires are set up over the hollow of zigzag.

** Wires are set up over the top of zigzag.

と考えられる。そのほかに角や突起のある電極形状ほどコロナ電流は増加する特性を示している。したがって、電極の幾何学的寸法効果が大きく影響する。

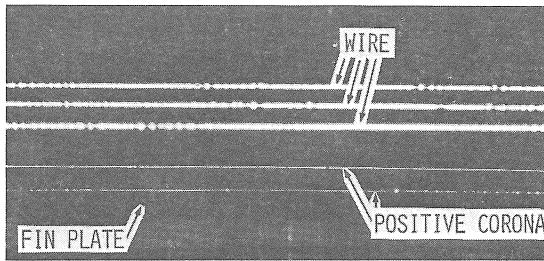
表1に種々の電極形状におけるコロナ開始電圧 V_c (トリニティバルスの始発), 火花電圧 V_s および集じん電極側からの正コロナ開始電圧 V_p (暗室での観察) を $I_h = 6$ A の場合について示している。ただし電源電圧の関係ですべての電極形状についての V_s の測定はできなかった。

本実験では、ジグザグプレートおよびフィンプレートの場合のみ、その突起部に正コロナの発生が観察された。図4から明らかなように V_p 以上の特性は V_p 以下の直線特性と異なった勾配の大きい直線特性を示している。なお、装置は異なるが同様な傾向を文献2)の図18に報告した。これらの2直線の折点(V_p)以上の電圧で明瞭に観察されるフィンプレートでの正コロナ発生状況の写真を図5に示す。この写真的上部3本の太い線は放電線の負コロナ電離現象で、下側の細い2本の線は正コロナ電離現象であって、フィン部先端に沿って発光がみられる。このような正コロナ電離現象はダスト粒子捕集にとって非常に好ましくない現象なので、ジグザグプレートおよびフィンプレートの集じんに有効な電圧範囲は V_s ではなくて V_p で制限される。

4. 負イオン風の挙動

放電電極の極性によって正イオン風、負イオン風または交流イオン風などの風が発生し、それぞれの風速特性などにわずかな相違²⁾がある。しかし、ここでは実用EPを考慮して、負イオン風だけの挙動について考察する。

イオン風の風圧ならびに渦流現象が集じんに効果的な



E = 6×10^5 V/m, I = 13.7×10^{-4} A/m, Zoom 200 mm, F 5.6, 210 s, ASA 400

図5 フィンプレートにおける正コロナ放電

Fig. 5 Positive corona discharge on the fin plate electrode.

面と再飛散の一因になると推論⁵⁾される観点から、3本の放電線からのそれぞれのイオン風の相互干渉ならびにガス流がイオン風の挙動に及ぼす影響などを各電極形状の場合について実験的検討を行なう。ガス流のない場合のイオン風の挙動はガス流がある場合の挙動の基本となるので、ガス流がない場合とある場合(1 m/s)に分けて考察する。現象の説明を容易にするために、放電線から集じん電極に到達するまでのイオン風を主流とよび、集じん電極に衝突したあとのイオン風を分流とよぶこととする。なお、印加電圧が低い場合は主流形成が十分でないので、コロナ輝点が旺盛な状態での挙動観察である。

4.1 平板電極

コロナ輝点を発生源とする負イオン風の挙動は、コロナ輝点の不定常性のため時々刻々と変化する。ガス流がなく、放電線1本の場合の挙動モデル図を図6に示す。正面方向からは、平板電極近傍で変動する小さな渦流現象が観察される。一方、側面方向からはイオン風の挙動変化がみかけられない。したがって、渦流は放電線直下のみに発生するようである。しかし、放電線が多並列の場合、分流の相互干渉によって側面にも変化が生じる。

ガス流がない図2(a)の場合の挙動写真の一例とそのモデル図を図7(a)および(b)にそれぞれ示す。イオン風の主流が平板電極に衝突したあとの分流は平板電極に沿っていき、放電線間隔のほぼ中間点で他の分流と衝突する。この点では垂直方向のイオン風圧も弱いので、相互干渉した分流は垂直方向に立ち上がり、空気の粘性作用と相まってもとの主流に引き入れられる。その結果、放電線間に二つの渦流が形成される。したがって、図6(b)のように放電線が1本の場合とは異なる挙動を示す。

ガス流速がある場合、イオン風はガス速度との合成方向にその主流を形成する。この場合、主流が押し流されるので、その分流もほとんどがガス流方向に向かう。し

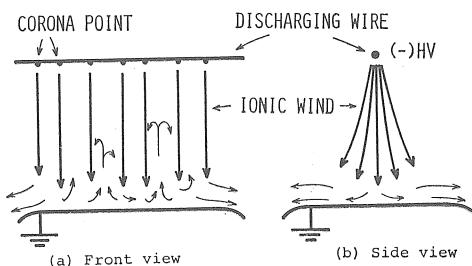


図6 線対平板電極における負イオン風の挙動

Fig. 6 Behavior of negative ionic wind with a wire-plate electrode.

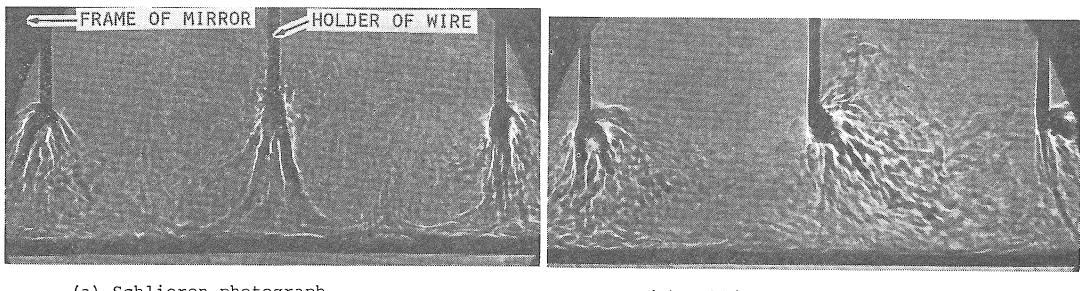
たがって、分流相互の干渉がなく渦流は生じにくい。放電線直下の平板電極近傍において、わずかながら渦流が生じる。この場合の挙動例とそのモデル図を図7(c), (d)にそれぞれ示す。

ガス流速の大きさによってイオン風の主流が平板電極に衝突する角度が異なってくる。この角度が大きい(ガス流速小)場合は、イオン風圧によってダスト粒子の集じん極への駆動効果が考えられる。一方では、その風圧によって堆積ダストの剝離に伴う再飛散現象も十分に考えられる。ガス流速が大きいほど主流の衝突角度は小さく、イオン風圧によるダストの剝離は減少するが、ダストを集めん極へ駆動する効果も減少すると思われる。一般にイオン風の挙動とダスト粒子の挙動は当然区別して考えねばならないが、ガス流速とイオン風の挙動関係は集じん効率に影響を及ぼすことが十分推察される。

4.2 オフセットプレート

ガス流がない場合のイオン風の挙動例とそのモデル図を図8(a), (b)にそれぞれ示す。イオン風の主流は凹部の底面と凸部の角に向かって発生する。凹部の底面での分流は主流による風圧で封じ込まれた状態となり、放電線直下を中心として凹部内に二つの渦流を形成する。凸部の上面に沿って移動する分流は、他の放電線分流と凸部上面の中央部で衝突し、放電線方向に向かう。

オフセットプレートでのイオン風の挙動は、電極間距離と凹凸の幾何学的寸法によって電位分布が異なるので凹部内の挙動に相違が見られる。その挙動モデル図を図9に示す。放電線と凸部上面位までの距離Lが凹部の深さDより小さい場合には、(a)に示すように凹部内で渦流が発生しない。これは放電線直下において電位分布が密になり、イオン風の主流は凸部の角よりも放電線直下に集中するためと思われる。LがDの2倍程度になると、放電線直下の電位分布密度が緩和されて主流は広がる。その風圧によって(b)に示すように凹部内で渦流が封じ込まれた状態となる。LがDの4倍程度になると

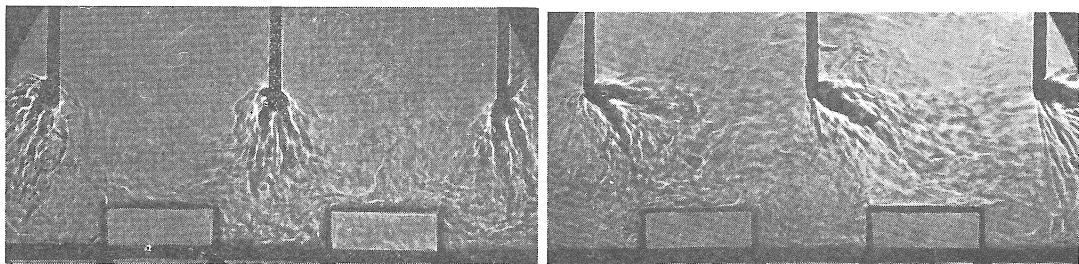


(a) Schlieren photograph

(c) Schlieren photograph

図7 平板電極における負イオン風の挙動

Fig. 7 Behavior of negative ionic wind with the plate electrode.



(a) Schlieren photograph

(c) Schlieren photograph

図8 オフセットプレートにおける負イオン風の挙動

Fig. 8 Behavior of negative ionic wind with the offset plate electrode.

さらに主流は広がり、凹部内のイオン風圧が均一に近づくため、(c)に示すように凹部内の渦流は小さくなる。

ガス流がある場合の挙動例とそのモデル図を図8(c), (d)にそれぞれ示す。凸部の角で主流の一部が分

離され凹部内に進入する。主流の大部分は凸部上方を通過する。凹部内で発生する渦流の挙動は前述の L , D による寸法効果に影響されないようである。

ガス流と反対方向に移動する凹部内の分流は、凸部上

面のイオン風圧に比較して非常に弱いと思われる。したがって、凸部の上面でダストの剥離が生じても渦流で凹部底面にダストが運ばれる可能性がある。この場合のように風圧が弱い渦流現象はダストの付着促進に寄与し、

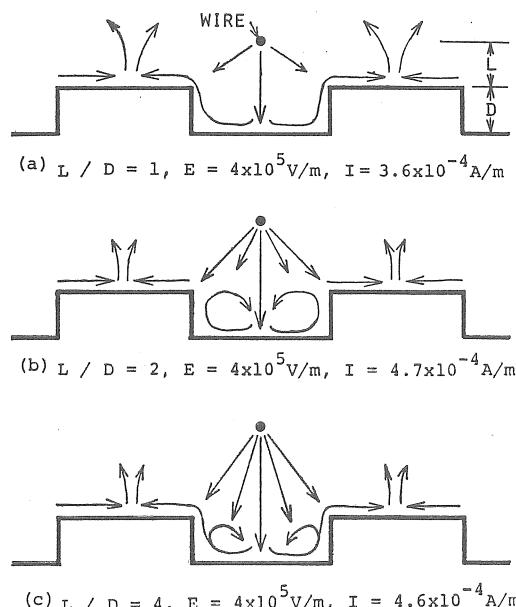


図9 オフセットプレートにおけるイオン風の挙動に及ぼす電極間距離の影響

Fig. 9 Effect of the size on behavior of ionic wind with the offset plate electrode.

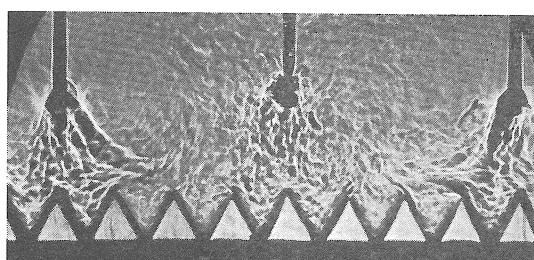
集じんに効果的作用を及ぼすと考えられる。

4.3 ジグザグプレート

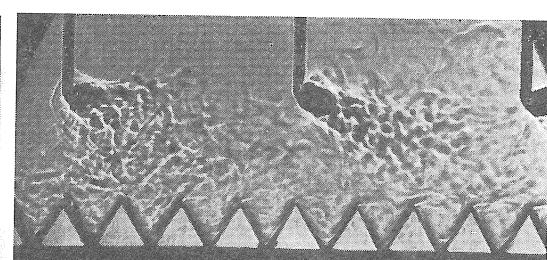
ガス流がない場合の挙動例とそのモデル図を図10(a), (b)にそれぞれ示す。放電線直下のジグザグの頂点でイオン風の主流は分離され、放電線間隔の中央の集じん電極近傍で分流相互の衝突が生じる。この場合は渦流が形成されないようであるが、放電線直下の凹部内は他の凹部内よりもイオン風圧が非常に強いようである。

図2(c)の電極間距離ならびに放電線間隔をそれぞれ半分にすると凹部内で渦流が生じる。この場合、図11(a), (b)に示すように放電線がジグザグの山あるいは谷の上にあるかによって電位分布が異なるため、イオン風の主流の発生状態も変わり挙動に相違がある。放電線が山の上にある場合、主流は一つとなり(a)のような渦流パターンとなる。放電線がジグザグの谷の上にある場合、主流は両側の頂点に対して生じ、(b)のように主流に封じ込まれた渦流パターンとなる。放電線間隔の中間に位置する凹部内への分流は弱く、渦流は形成されない。

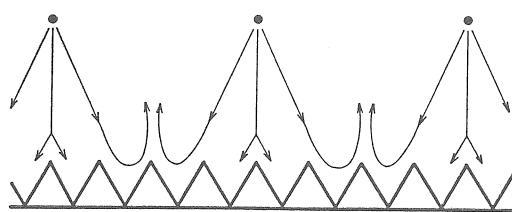
ガス流がある場合のイオン風の挙動例とそのモデル図を図10(c), (d)にそれぞれ示す。分流はジグザグの頂点に沿って移動していくが、その一部はジグザグの各凹部内に進入して渦流を形成する。これらの渦流は、頂点に沿っていく分流によって凹部内に封じ込まれる。凹部内での渦流は風圧も強くなく、ダストの付着効果促進に効果的作用があると推察される。なお、放電線が山ある



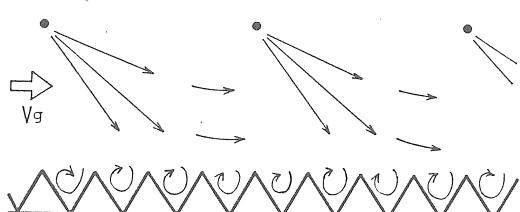
(a) Schlieren photograph



(c) Schlieren photograph



(b) Model of photo. (a)
 $V_g = 0 \text{ m/s}$, $E = 4 \times 10^5 \text{ V/m}$, $I = 4.8 \times 10^{-4} \text{ A/m}$



(d) Model of photo. (c)
 $V_g = 1.0 \text{ m/s}$, $E = 4 \times 10^5 \text{ V/m}$, $I = 4.1 \times 10^{-4} \text{ A/m}$

図10 ジグザグプレートにおける負イオン風の挙動

Fig. 10 Behavior of negative ionic wind with the zigzag plate electrode.

いは谷の上にあっても、ガス流がある場合のイオン風の挙動には相違が認められなかった。また、スパーク直前ではジグザグプレートの頂点に正コロナが観察されたが、イオン風の挙動パターンにはとくにその影響は認められなかった。ジグザグプレートでは火花電圧が低く、正コロナも生じるのでこれらを考慮すれば、ジグザグの角をまるめた波形電極のほうが有効だと思われる。

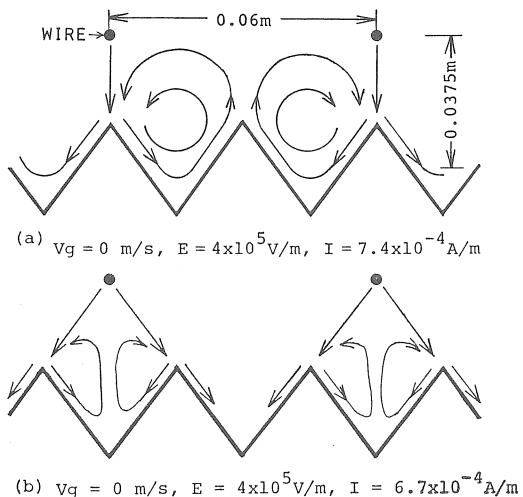


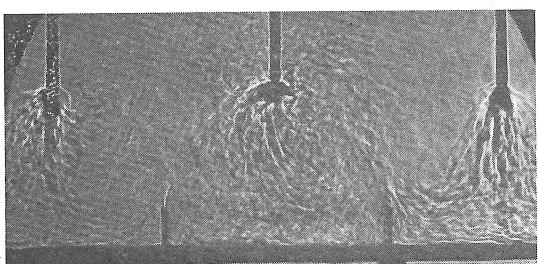
図 11 ジグザグプレートにおけるイオン風の挙動に及ぼす放電線配置の影響。

Fig. 11 Effect of the wire arrangement on behavior of ionic wind with the zigzag plate electrode.

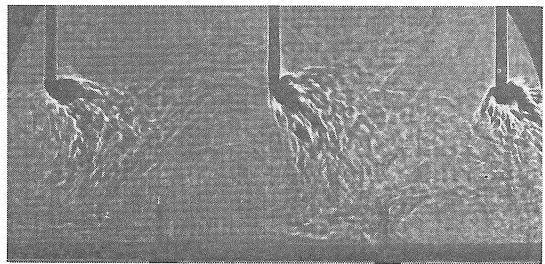
4.4 フィンプレート

ガス流がない場合の挙動例とそのモデル図を図 12 (a), (b)にそれぞれ示す。フィンプレートのほうが平板電極の場合よりもイオン風の主流は広がる傾向がある。これはフィン部の先端に電界が集中し、放電線からフィン部先端にイオン流が供給されるため、それに伴ってイオン風の圧力分布が平板電極の場合よりも広がるためと思われる。フィン間隔やフィンの高さなど幾何学的効果を考慮しなければならないが、本実験条件での主流は放電線直下が大部分である。平板に衝突後の分流は平板に沿ってフィン部に衝突し上昇するが、放電線とフィン部間のイオン風によって抑え込まれた状態となり渦流を形成する。渦流は平板電極の場合よりも小さくなる傾向を示す。また、図 5 に示すように印加電圧を高くすると、フィン部先端に沿って正コロナが発生する。正コロナが生じるとフィン部から放電線に向けて正イオン風の発生²⁾を伴うが、その方向が渦流の回転方向と同じであるために、これらを明確に区別できなかった。

ガス流がある場合の挙動例とそのモデル図を図 12 (c), (d)にそれぞれ示す。主流の大部分はフィンによってせき止められ、平板電極に沿って逆流する。その結果、主流と主流の間に渦流が形成される。主流が衝突する部分ではダストの剥離が生じる可能性もあると思われるが、平板部を逆流する分流によって、ダストの付着効果が促進され、渦流によるダストの集じん電極方向への駆動効果も考えられる。したがって、イオン風の挙動の観点からは平板電極よりもフィンプレートのほうが集じ



(a) Schlieren photograph



(c) Schlieren photograph

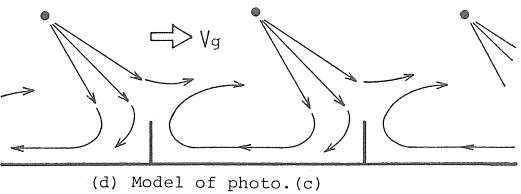
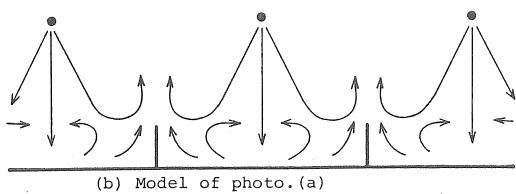


図 12 フィンプレートにおける負イオン風の挙動

Fig. 12 Behavior of negative ionic wind with the fin plate electrode.

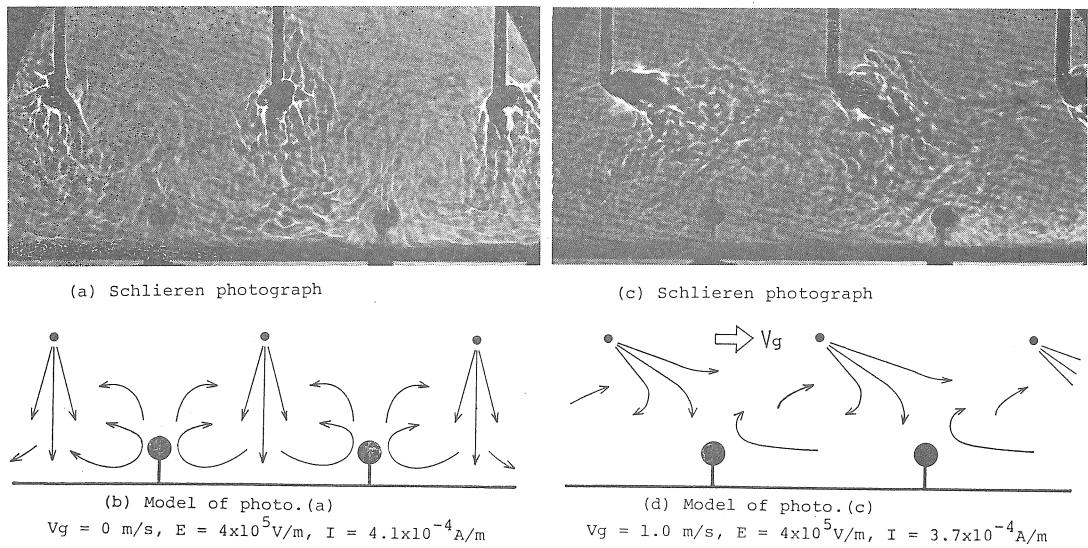


図 13 リブ付きフィンプレートにおける負イオン風の挙動

Fig. 13 Behavior of negative ionic wind with the fin plate with rib electrode.

んに効果的と考えられる。ただし、正コロナの発生を考慮する必要がある。主流の大部分がフィンにせき止められる要因としては、ガス流速に対応した印加電圧、フィンの高さ等が関係する。

4.5 リブ付きフィンプレート

ガス流のない場合の挙動例とそのモデル図を図 13 (a), (b)にそれぞれ示す。フィン部に取り付けたリブのために電界集中が緩和され、リブへのイオン流供給は減少する。そのため主流の発生状況は平板電極の場合と類似する。分流がフィンに沿って上昇する際にリブが流れの抵抗となり、分流の立上りを阻止する働きが認められる。

ガス流がある場合の挙動例とそのモデル図を図 13 (c), (d)にそれぞれ示す。フィンプレートの場合と類似の挙動を示すが、リブにおける分流の立上りがリブの抵抗効果で弱められ、フィンプレートの場合よりも大きな渦が形成されない傾向にある。なお、正コロナ放電ならびに火花電圧の対策を考慮したリブ付きフィンプレートのほうがフィンプレートよりも有効である。

5. ま と め

種々の集じん電極形状について、その放電空間での負イオン風の挙動をシュリーレン法で調べ、挙動パターンとその発生過程ならびにガス流との関係を実験的に考察した。これらの結果を要約すると次のようである。

- (1) 種々の電極形状における負コロナ放電特性は、コロナ電流の平方根で整理すると直線関係で近似され

る。ジグザグプレートおよびフィンプレートでは、高電界強度で集じん電極側から正コロナが発生し、集じんに有効な電界強度範囲が制限される。

- (2) ガス流がない場合、イオン風の主流の大部分は放電線直下に形成される。集じん電極に衝突したあと、のイオン風の分流は、平面上を沿う性質がある。面上の凸部で流れの向きを変えるが反射されない。この分流が電極形状に関係して、渦流を形成する。
- (3) ガス流がある場合、イオン風の主流はガス流との合成方向に生じる。集じん電極面の凸部または凹部で流れが阻止されるため、分流は凹部内あるいは凸部間を逆流する。その結果、主流が弱い空間で渦流が形成される。
- (4) 主流はその風圧作用によって、集じん電極へのダストの駆動と堆積ダストの剥離を生じ、集じん作用力として効果的な面と逆効果的な面を同時にもつと推察される。一方、渦流はその風圧も弱く、ダストの付着捕集効果の促進に寄与することが考えられる。
- (5) (3), (4)の観点から、平板電極よりもオフセットとフィンプレートが有用である。しかし、オフセットの凸部は風圧が強く、実効集じん面積が減少するためフィンプレートのほうがよい。そして、フィンプレートに正コロナ対策を施したリブ付きフィンプレートがさらに有効である。一方、ジグザグプレートはイオン風作用の効果と実効集じん面積が大きいことを考えあわせれば実に有効的であるが、正コロ

ナ、火花電圧を考慮した対策が必要である。このことから、ジグザグの角をまるめた波形電極がさらに有効と推察される。

イオン風が存在する気流中のダストの挙動は、粒径、帯電量、電界強度等によって左右されるが、再飛散現象の防止電極を検討するうえでイオン風の挙動ならびにその捕集作用効果は重要な要素である。今後、種々の電極におけるイオン風の挙動とダスト粒子の挙動関係を検討する必要がある。

終りに、本研究について、ご助言をいただいた元本学教授橋本清隆博士ならびにご支援をいただく九州大学赤崎正則教授、原雅則助教授に深甚なる謝意を表します。また、熱心に実験を援助していただいた西日本工業大学

寺本静夫(現在日本電信電話公社)、中山敏和(現在九州電気建設工事㈱)の両君に深く感謝します。

参考文献

- 1) M. Robinson : Am. J. Phys., 30 (1962), 366.
- 2) 足立宜良、川崎元之：静電気学会誌, 2, 3 (1978), 158.
- 3) W. Deutsch : Ann. Phys., 476 (1925), 729.
- 4) 足立宜良、増田閃一、阿久津顯右：電気学会論文誌 A, 97, 5 (1977), 259.
- 5) 足立宜良：電気学会論文誌 B, 93, 7 (1973), 273.
- 6) 足立宜良、川崎元之、中林広光：静電気学会誌 4, 3 (1980), 152.
- 7) S. Oglesby and G.B. Nichols : *A Manual of Electrostatic Precipitator Technology Part I*, p. 232, Southern Res. Inst., Birmingham (1970).
- 8) 橋本清隆、足立宜良：静電気とその工業への応用, p. 92, 東京電機大学出版局 (1973).