

イオン風が模擬湿式EPの液膜に与える影響

足立宜良*・陶山俊道*・三木俊克**・川崎元之***

Influence of ionic wind on the collecting liquid film in wet type model EP

Takayoshi ADACHI, Shundō SUYAMA, Toshikatsu MIKI
and Motoyuki KAWASAKI

Abstract

It is the purpose of this paper to investigate the influences of ionic wind on the collecting water film in wet type electrostatic precipitator. In order to study this influences, behaviour of the water surface and the ionic wind were observed in needle or wire to water electrode.

The results of these experiments may be summarized as follows.

- (1) The water surface is hollowed by the ionic wind pressure in needle to static water electrode. The depth and the diameter of this hollow is in proportion to corona current at a range of measurement.
- (2) The pressure of the ionic wind presses the flowing water film. It is considered that the pressure contribute to suppression of entrainment of the flowing water film.
- (3) The ionic wind stir up the water film. It is considered that this effect is one of the collecting forces.

1. 緒 言

湿式の電気集じん装置（以下湿式EPと略称）は高い集じん効率をもつ¹⁾と同時にSO_xの吸収除去ができる²⁾等の特徴を持っており、ハイブリッド方式³⁾の開発等に伴い広く実用されることが期待される。

放電極からのコロナ放電に伴って発生するイオン風は集じん極液膜を押し、液膜の形成に大きく影響すると考えられる。また、湿式EPによるSO₂除去においてもイオン風が大きく寄与していると考えられている²⁾。このように、湿式EPにおけるイオン風の影響はかなり大きいものと考えられるが、その詳細については十分に明らかにされていない。

本論文は、湿式EPにおいて、イオン風が集じん極液膜に及ぼす効果を明らかにする目的で行なった基礎実験結果の報告である。

実験では、イオン風の効果が良くわかるように、針（あるいは線）対水面電極でコロナ電界を構成した。この水面電極が静止水面および流下水膜である場合について、イオン風圧による水面電極の動静を観察した。

また、シュリーレン装置を用いてイオン風の挙動を観察し、イオン風が湿式EPにおいて集じん極液膜に及ぼす効果について考察した。

2. 実験装置

Fig. 1に針（線）対水面電極の実験装置を示す。針電極に印加する負の直流高電圧Eは100V、60Hzの交流をネオントランス（350VA）で昇圧した後全波整流したものである。針電極数は1針と3針について実験を行なった。線電極の場合も電源は同じである。

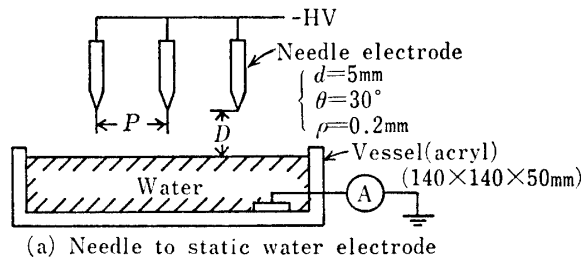
流下水膜電極を形成するため供給される水の流量は、実用の湿式EPを考慮して水膜の厚さが約0.5mmとなるように調節した。

これらの実験において、水面電極の観察は肉眼および写真撮影により行なった。また、水面上のイオン風速分布を知るために、水面電極の代りに金網電極（目開き3.79mm）を用い、金網電極後方5mmの位置に設置したサーミスタ風速計により、各位置のイオン風

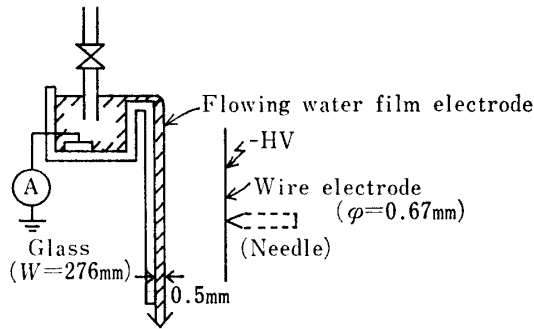
* 工学部電気工学科

** 電気工学科大学院（現在工業短期大学部電気工学科）

*** 西日本工業大学



(a) Needle to static water electrode



(b) Wire to flowing water film electrode

Fig. 1 Experimental apparatus of needle to static water electrode and wire to flowing water film electrode

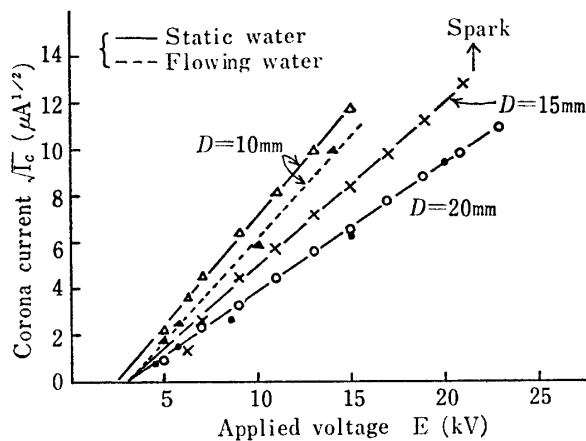
速を測定した。

イオン風の挙動の観察は凹面鏡対向法シュリーレン装置⁴⁾を用いて行なった。このとき、イオン風の観察を容易にするためにヒータ巻線(約 100W)を放電極に取り付けて加熱している。

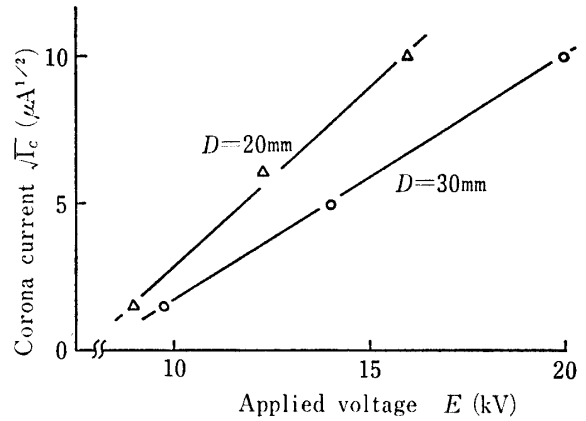
なお、実験は静止大気中で行なった。

3. コロナ放電特性とイオン風速分布

イオン風はイオンの移動によって生じ、コロナ電流 I_c と密接な関係がある。Fig. 2 (a) は 1 針対水面電極のコロナ放電特性を示す。縦軸に I_c の平方根をと



(a) Needle to static water electrode



(b) Wire to flowing water film electrode

Fig. 2 Characteristics of corona discharge

ると、電極間隔 D をパラメータとしていずれもほぼ直線で表わすことができる。このことは 1 針対鉄製平板電極と同様である⁵⁾。流下水膜と静止水面では若干特性が異なっているが、これは温度、湿度等の雰囲気条件が異なるためである。

Fig. 2 (b) は線対流下水膜電極のコロナ放電特性で、前述と同様の傾向を示す。流下水膜の場合、流量を変えても特性にはほとんど差が認められなかった。

つぎに、Fig. 3 は水面電極の代りに金網電極を用いて測定した 1 針の場合のイオン風速分布である。ただ

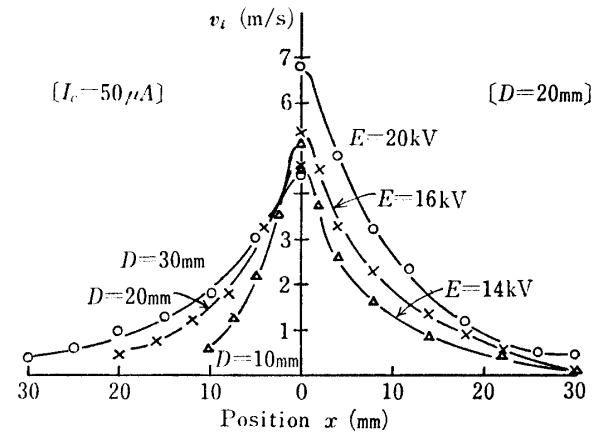


Fig. 3 Distribution of ionic wind velocity for one needle to net electrode

し、針直下の点を $x=0$ とし、特性は左右対称なので半分だけを示す。 D を一定とすると印加電圧 E の上昇とともにイオン風速は大きくなる。 I_c を一定とすると D の増大とともにイオン風速ピーク値は若干減少するが、分布域が広がる。

4. 針対静止水面電極における水面の挙動

4.1 水面の挙動

針電極印加電圧 E を徐々に上昇させると水面の挙動は Fig. 4 のように変化する. このような現象が生じることはすでに報告⁶⁾ がなされている.

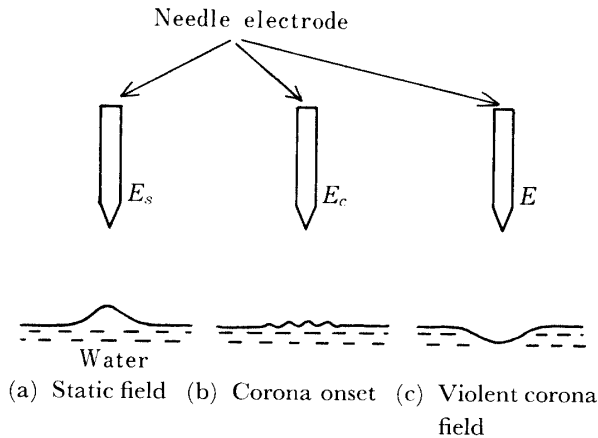


Fig. 4 Phenomena of water surface under the electrical field⁶⁾

Fig. 4 (a) は, 電圧が低くコロナ放電を生じる前の現象で, 静電気力によって水面はわずかに盛り上がる. 電圧を上昇してコロナ放電開始直後では, イオン風が発生して静電気力とほぼ均衡し, Fig. 4 (b) のように水面はわずかに動揺しながら平坦になる. さらに電圧を上昇して旺盛なコロナ放電を生じるようになると, イオン風圧が大きくなり, 水面は Fig. 4 (c) に示すようなくぼみを生じる.

このとき, 水面に少量の墨汁を滴下すると Fig. 5 (a) に示すような対流現象が観察される. この水の対流現象は, 針対平板電極のイオン風のシュリーレン写真 (Fig. 5 (b)⁷⁾ から分るように, 水面に衝突したイオン風が水面に沿って流れ去るため, 水面がイオン風

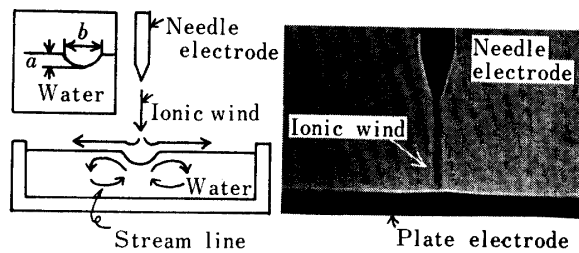


Fig. 5 Convection of water and schlieren photograph of ionic wind at the violent corona field (One needle)

Fig. 5 Convection of water and schlieren photograph of ionic wind at the violent corona field (One needle)

にひきずられて生じるものと考えられる.

この対流現象は Fig. 6 に示すように針電極を3本

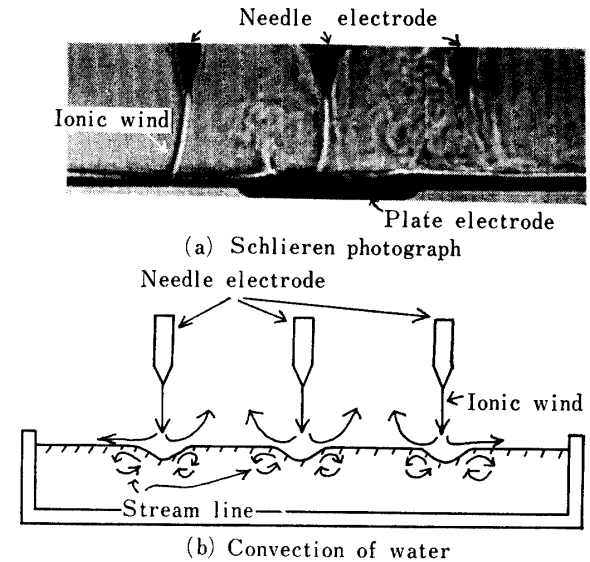


Fig. 6 Convection of water and schlieren photograph of ionic wind at the violent corona field (Three needles)

にすることによってさらに明らかとなる. 3針の場合は Fig. 6 (b) の写真のように針先端から生じたイオン風が平板電極と衝突し, 平板表面に沿って拡がり, 他針から同様に生じたイオン風と衝突して針電極方向へ吹き返し, 渦流現象を生じる (文献7)参照). このような電極間のイオン風の挙動に対応して, 水面電極中では Fig. 6 (a) のような対流現象が観察される.

以上のことから, イオン風は水面と接触して静止水面電極に対流現象を生じさせることが明らかとなった. このことは, 接触している水と空気の間膜にも変化を与えることが考えられ, 湿式EPにとって影響をもつと推察される.

4.2 コロナ電流に対するくぼみの変化

イオン風によって生じるくぼみの形状が, コロナ電流に対してどのように変化するかについて考察する. Fig. 5 (a) に示すように, くぼみの最深点の深さを a (cm), くぼみの直径を b (cm) とする.

1針対水面電極におけるくぼみの深さ a とコロナ電流 I_c (μA) との関係は, 多数の写真から求めた結果, Fig. 7 のようであり, 実験条件範囲内では次の実験式で示される.

$$a = k_1 I_c \quad (1)$$

ここで, k_1 は電極配置や雰囲気および水の粘性度等

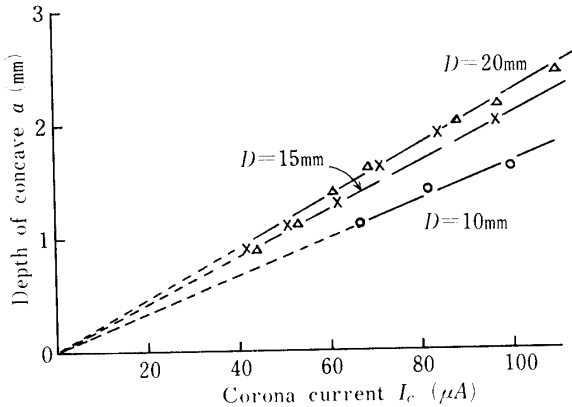


Fig. 7 Depth of concave water surface in one needle to static water electrode

で決まる定数である。Fig. 7で、直線を破線のように延長すると原点に収束するが、実際には Fig. 4で説明したように、あるコロナ電流のところで a が零となると考えられる。

Fig. 8はくぼみの直径 b とコロナ電流 I_c との関係

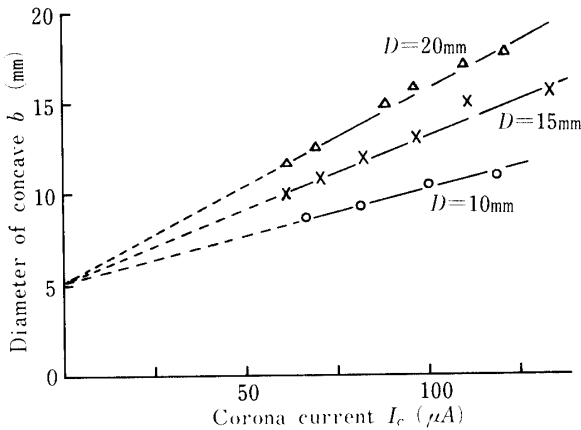


Fig. 8 Diameter of concave water surface in one needle to static water electrode

を示したものであり、前図同様に次の実験式で表わされる。

$$b = k_2 I_c + k_3 \quad (2)$$

ただし、 k_2 は電極配置や雰囲気等で、 k_3 は雰囲気等で定まる定数である。Fig. 8においても実験範囲内の直線を破線のように延長すると縦軸のほぼ一点に収束するが、Fig. 7で述べたことと同様のことが言える。

なお、3針対静止水面電極でも、針電極間隔が比較的大のときは、中央の針のコロナ電流と直下のくぼみとのあいだには、(1)、(2)式と同様な関係が成り立つ。

以上のように、水面のくぼみは電極間隔 D が一定

のときは、コロナ電流の増大とともに大きくなっている。これは、3章で述べたように、印加電圧を上昇させるとともにコロナ電流とイオン風速が増加することによる。また、同一電流ではくぼみの大きさは電極間隔 D が大きい方が大である。これは、Fig. 3からわかるように、 D の変化に対してイオン風ピーク値はさほど変化しないが、分布域が大となるためと考えられる。

4.3 水面に作用する力

イオン風によって水面がくぼんだ状態において水面に作用している力を分類すると次のようになる。くぼみを生じさせる力としてはイオン風圧力 P_i 、平面に戻す力としては水圧 P_w や表面張力による圧力 P_s 、静電気力等が考えられる。

針直下で水面に衝突したイオン風は鉛直方向の流速は零となり、水面に沿って流れて水面に作用する。針先端から中心軸上の流線を考えて、イオン風圧 P_i (dyn/cm^2) は衝突前のイオン風の動圧とほぼ等しいとすると次式の関係が得られる。

$$P_i = \frac{1}{2} \rho_a v_{ip}^2 \quad (3)$$

ただし、 ρ_a (g/cm^3) は空気密度、 v_{ip} (cm/s) は針対金網電極で測定したイオン風速最大値であり、針電極直下の値である。

さて、イオン風速最大値 v_{ip} とコロナ電流 I_c との関係として Fig. 9 の特性が得られ、次式が成り立つ。

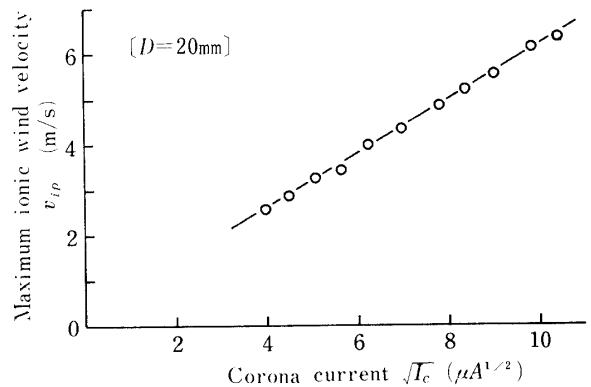


Fig. 9 relation between ionic wind velocity and root square of corona current in one needle to net electrode

$$v_{ip} = k_4 \sqrt{I_c} \quad (4)$$

ただし、 k_4 は電極配置、雰囲気等で定まる定数であ

る。なお、(4)式は仮定に基づいて導いた Robinson の式⁸⁾とも一致する。

針直下の水面に作用するイオン風圧 P_i とコロナ電流 I_c との関係は、(3)式と(4)式とより次のようになる。

$$P_i = \frac{1}{2} \rho_a k_i^2 I_c \quad (5)$$

なお、(1)式と(5)式より

$$a = \left(\frac{2k_i}{\rho_a k_i^2} \right) P_i \quad (6)$$

となり、くぼみの深さ a はイオン風圧 P_i に比例するという関係が得られる。

つぎに、イオン風圧に対向する力のうち、まず水圧 P_w (N/m²) はくぼみの深さ a (cm) として次式から容易に計算できる。

$$P_w = \rho_w a \quad (7)$$

ただし、 ρ_w (g/cm³) は水の密度である。

表面張力による圧力 P_s (dyn/cm²) は、水面のくぼみを円の一部としてその曲率半径を r (cm) とすると次式で与えられる。

$$P_s = \frac{2\sigma}{r} \quad (8)$$

ただし、 σ (dyn/cm) は水の表面張力である。

水面に作用する静電気力にはクーロン力と誘電作用力⁷⁾とがあるが、水面近傍では電界強度の変化が比較的少ないので、後者は非常に小さいと考えられる。水面に作用するクーロン力の計算は、不平等電界でコロナ放電が行なわれているため非常に困難であるが、近似的には印加電圧の2乗に比例し電樹間隔 D の2乗に反比例すると考えられる。

以上の諸式を用いて水面に作用する各力の計算を行なった。その一例を Table 1 に示す。Table 1 より、

Table 1 Example of calculation value of forces acted on water surface

$D=20$ mm	$E=16$ kV		$E=20$ kV	
	dyn/cm ²	P_r/P_i (%)	dyn/cm ²	P_r/P_i (%)
Ionic wind pressure P_i	216	100	354	100
Water pressure P_w	108	50	198	56
Pressure of surface tension P_s	51	23	100	28

旺盛なコロナ放電を生じているときは、イオン風圧のうち約50%が水面をくぼませる力となり、約25%が表面張力と、残り約25%がクーロン力や水の対流を誘起する力とのつり合いとなっていると考えられる。

すなわち、水面にはクーロン力の4倍以上ものイオン風圧が作用していると考えられる。実用湿式EPでは電極間隔 D が 10cm 以上にもなるのでクーロン力はさらに小さくなり、集じん極はもっぱらイオン風圧のみを受けると考えられる。よって、荷電状態にある湿式EPでは、水膜の飛沫同伴を生じにくい⁹⁾ ということは、イオン風圧の寄与するところが大きいことによると考えられる。

5. 流下液膜へのイオン風の影響

5.1 1 針対流下液膜

1 針対流下液(水)膜においても、針電極正面の水膜はイオン風圧を受け、ガラス板に強く押しつけられる。このとき、水膜はわずかにくぼむが、水が流下しているため、静止水膜にくらべてくぼみの深さは小さくなり、Fig. 10 (a) のような波紋を生じる。この波

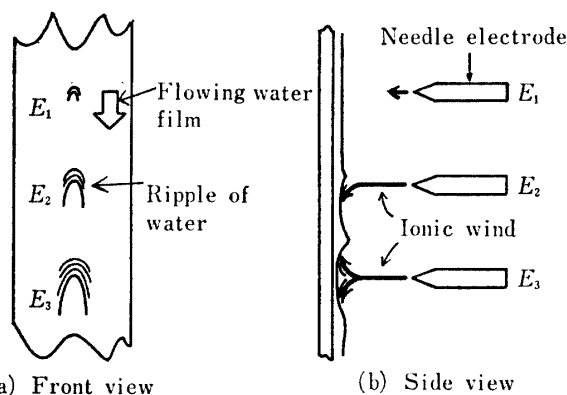


Fig. 10 Schematic diagram of flowing water film due to ionic wind at one needle, where applied voltages come from the relation $E_1 < E_2 < E_3$

紋は印加電圧 E を上昇するに従って、すなわち $E_1 < E_2 < E_3$ の関係に従って広がる。また、この状態で流下水膜に墨汁を混ぜて流すと、針電極正面で波紋のパターンに従って流下水膜を攪拌する現象が観察される。この現象はコロナ電流を増すほど盛んになる。

上述の状態のとき、シュリーレン装置でイオン風を観察すると Fig. 10 (b) のような現象が認められた。イオン風速が比較的低いときは流下液膜とイオン風との接触によってイオン風は流水方向へ曲げられる。イオン風速が大になると流下水膜に逆らってイオン風が

流れる。

5.2 線対流下液膜

線電極は針電極が連続的にならんだものと考えられる。電圧を $E_1 < E_2 < E_3$ と上昇させたときのイオン風を観察すると Fig. 11 のようである。電圧が比較的低

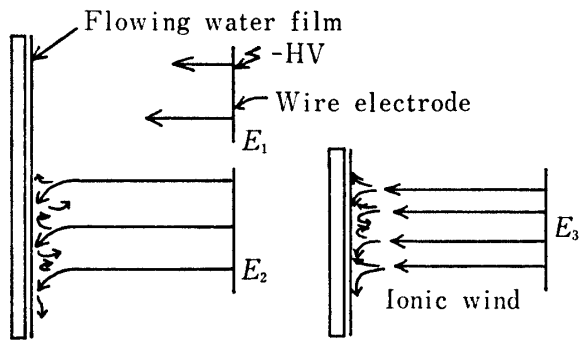


Fig. 11 Schematic diagram of ionic wind at wire to flowing water film electrode, where applied voltages come from the relation $E_1 < E_2 < E_3$

くイオン風がさほど速くないときは流下液膜の流れの方向に曲げられる傾向があるのは針電極のときと同様である。しかし、コロナ輝点が多数あるため、水面に衝突した後のイオン風相互の干渉によって渦流現象が認められる。さらに電圧を上昇させるとコロナ輝点も増加し、イオン風速も大きくなり、渦流現象も複雑となる。

流下液膜はイオン風圧によって平板に押しつけられて線に沿ってわずかに溝が生じる。この溝はイオン風速が大になるにつれて大きくなり、また、この部分の流下水膜の下流方向への流速はイオン風圧のために遅くなる。

湿式 EP における流下液膜はイオン風によって平板に押しつけられ、攪拌作用および4章で述べた対流作用を受けることが確認された。湿式 EP による SO_2 ガスの除去²⁾ においても、イオン風は水膜方向へ吹き、まず除去される SO_2 分子と液膜との接触面積を増加させる作用をする。さらに、水膜表面の境膜に吸収された SO_2 分子は H_2SO_3 の形で水に溶解し、イオン風による対流攪拌作用によりすみやかに水膜内部に移動すると考えられる。そのため、液膜表面の境膜の pH が異常に低下することなく、水膜表面が SO_2 捕集

に適する条件に常に保たれるものと考えられる。このことは、他の手法に基づいて実験を行なった片岡らの考察¹⁰⁾から理解される。

6. 結 言

以上の結果を要約すると以下のようなものである。

- 1) 針対静止水面電極においてイオン風は水面にくぼみを生じさせる。この深さ、ならびに直径は実験式 (1), (2) で示され、コロナ電流に比例する。
 - 2) 水面に作用するイオン風圧のうち、試算によるとコロナ放電が旺盛な状態では、約50%がくぼみによる水圧と、また約25%が表面張力と、残りの約25%がクーロン力や水の対流とつり合っている。
 - 3) 湿式 EP の集じん極液膜は (5) 式に示すように、コロナ電流に比例するイオン風圧を受け、イオン風は集じん極液膜の飛沫同伴防止に大きく寄与していると考えられる。
 - 4) イオン風は集じん極液膜の対流攪拌を誘起する。このことから液膜近傍の空気の境膜ならびに液の境膜の更新が行なわれていると判断される。これらの作用は、湿式 EP による SO_2 捕集などにおいて重要な集じん作用力の一つと考えられる。
- 本研究を行なうにあたって、御指導をいただいた増田閃一教授（東大工）ならびに橋本清隆教授（西日本工大）に深く感謝します。また、実験で援助いただいた本学池田隆枝官、本学48年度卒論生村重龍久君（現在三井石油化学 KK）に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 橋本清隆, 足立宜良: 静電気とその産業技術, 東京電気大学出版局 (1969) p. 55.
- 2) 足立宜良: 大気汚染研究, **4**, 188 (1970)
- 3) 増田閃一, 他4名: 昭和48年電気学会全国大会講演論文集, 838
- 4) 筒井俊正: 東京物理学校雑誌, **593**, 125 (1941)
- 5) 足立宜良: 表面, **12**, 557 (1974)
- 6) 例えば酒井長武, 三好保憲: 電学誌, **78**, 947 (1958)
- 7) 川崎元之, 陶山俊道, 足立宜良: 山大工研報, **24**, 99 (1973)
- 8) M. Robinson: Trans AIEE, **80**, 143 (1961)
- 9) 文献 1) の p. 147.
- 10) 片岡広, 宮内照勝: 化学工学, **30**, 409 (1966)