

# 水の噴出時および衝突時の負イオンの発生

下川 博文  
電気電子工学科

## Generation of Negative Ion on Ejection and Collision of water

Hirofumi SHIMOKAWA

### Abstract

It is known that the negative charged fog arises in the circumference of the water jet, when the water is ejected from the nozzle. This report examined the effects of induction field on generation rate of the negative or positive charged fog on the ejection and the collision of the water. In the ejection of the water, it was found that the charged fog increased over the 2 doigits, when the induction field is applied, and that the much charged fog arose in spite of the purity of the water. From the result, it was discussed that the position of the electrode greatly affects the generation of the charged fog in ejection of the water. In the collision of the water on the metal, it was found that the polarity of the electrification of the water jet did not agree with that of the charged fog. This phenomenon was discussed as collision phenomenon between the charged water jet and the water on the metal.

Key Words: Negative Ion, Induced Charging, Collosion, Metal, Water

### 1 はじめに

通常実験室レベルで液体の帯電度を評価する場合、流下式の測定装置が簡便な方法としてよく使われる<sup>1)</sup>。筆者らは流動帯電現象の従来の測定法への疑問から、水を試料とする流動帯電現象に影響する要因について実験を行っている<sup>2)</sup>。その結果、ノズルから水を噴出させると測定装置内に負の帯電霧が発生すること、およびその帯電霧による静電誘導が流動電流の値に重大な影響を与えることを詳細に報告した。さらに、数十m/sの高速噴出時にはノズルから正の帯電霧が発生すること<sup>3)</sup>、および衝突時にはさらに多量の帯電霧が発生し、その極性は衝突物体の材質に依存すること<sup>4)</sup>を報告した。

これらの結果から、水の噴出時および衝突時に帯電霧が発生する現象はオゾンを伴わないため、環境中へのクリーンなイオン源に利用できることが示唆される。本報告はウォータージェットの環境中へのイオン源の可能性について調べたものである。測定はほぼ層流である10m/s以下の低速領域で行った。水柱の周辺に誘導電極を設置した。この場合、次の2つの現象が帯電霧の発生に大きく影響することが予想される。

(1) 誘導電極の影響により、噴出時に発生する帯電霧の量が影響を受ける。

(2) ノズル内で発生する流動帯電に加えて、静電誘導により対象物に衝突するウォータージェットの帯電量が増大する。

水の純度および誘導電極の位置と噴出時の帯電霧の発生量の関係を明らかにする。さらに、金属上へ帯電したウォータージェットを衝突させた場合に特異な帯電現象が観測された。この原因についての説明を試みる。

### 2 測定

使用した水は製造時18.3 MΩcmの超純水、および抵抗率7.0 kΩcmの水道水である。除電のためリザーバタンク内に注水したのち1時間ほど放置したものを試料水として用いた。このとき超純水の場合、抵抗率は10 MΩcm程度に低下していたので高純水と呼ぶことにする。水道水の導電率には変化はみられなかった。

#### 2.1 噴出時の帯電霧の測定

噴出時の帯電霧の測定装置の全体図を図1に示す。

使用したノズルは内径0.3mm、長さ5cmの注射針で先端を直角にカットしたのち磨いたものである。試料水はリザーバタンクから内径6mmのポリウレタンチューブを通してノズルに導かれる。加圧はN<sub>2</sub>ガスにより行った。流速は最大10m/sのほぼ層流域である。このとき数cmの水柱が形成される。誘導電極には直径14mmのリング電極を用い、ノズルとリング電極間の最大±1000Vの直流電圧を印加した。ノズル先端とリング電極間の距離を $\ell$ とし、この $\ell$ の効果測定した。試料水を受ける容器は直径10cm、高さ13.5cmのステンレス製である。水滴が容器に衝



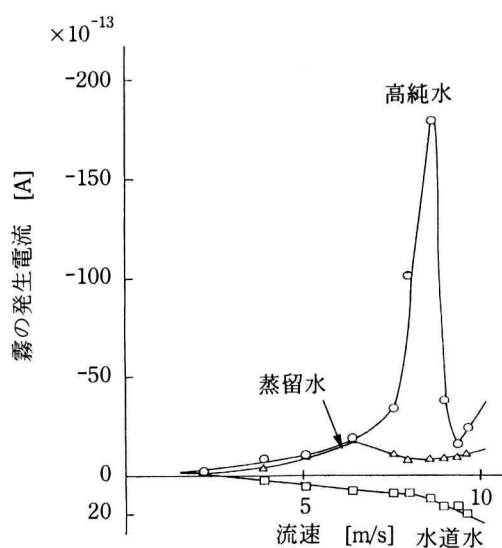


図4 発生電流の水の純度依存性

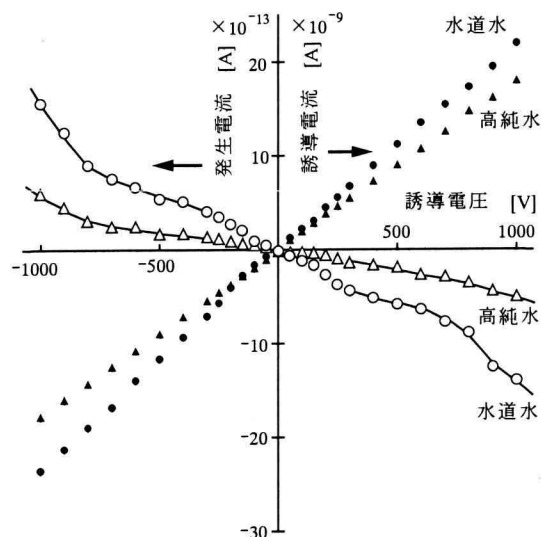
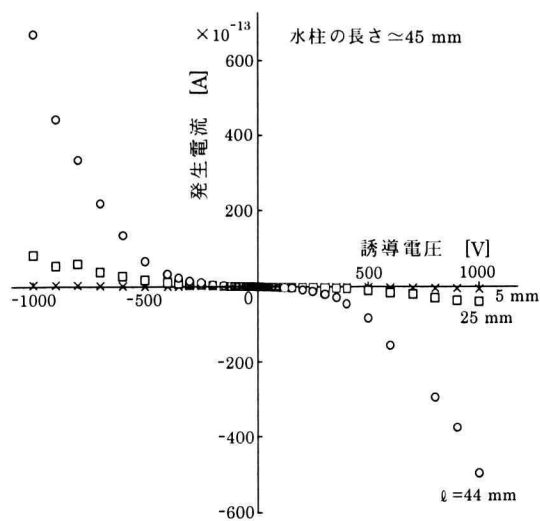
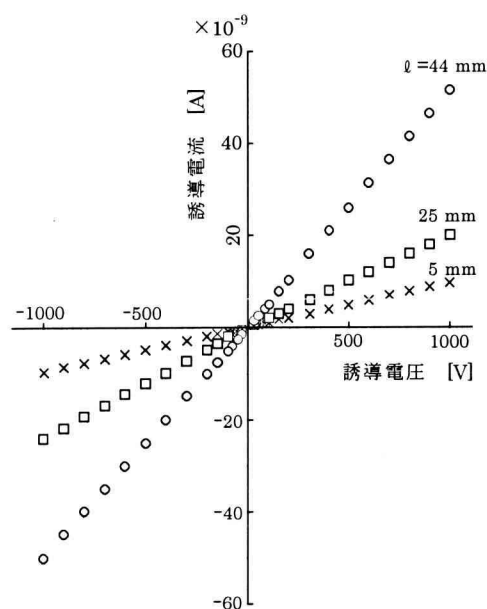


図5 高純水と水道水の比較



(a) 発生電流



(b) 誘導電流

図6 誘導電極の位置の影響

るので、 $l = 5 \text{ mm}$ の場合に数百V以上の誘導電圧で100倍以上の帯電霧の発生が可能であることがわかる。

## (2) 高純水と水道水の比較

誘導電圧がない場合、帯電霧の発生電流は水の純度が高くなると急激に増加することがわかっている。図4は以前に報告した例<sup>5)</sup>を再度示したものである。水の純度が高くなると、極めて狭い流速域で発生電流は大きなピークを持つことがわかる。ピーク付近の流速はノズルの長さや水の純度によって変動すること、およびピーク付近の流速は層流域から乱流域への遷移域であることはわかっている。しかし、このピークの発生機構は明らかではない。

図5は高純水と水道水の比較を示したものである。流速は $2.6 \text{ m/s}$ で、水柱の長さは約 $14 \text{ mm}$ である。誘導電極は水柱の長さとはほぼ同じで $l = 14 \sim 15 \text{ mm}$ である。同図から

誘導電流は水道水の場合の方が15%ほど大きいことがわかる。一方、帯電霧の発生電流は水道水の方が2.5倍ほど大きい。誘導電流はそれほど変わらないにもかかわらず発生電流に大きな違いがみられることから、水柱の持つ電荷の一部が微小水滴の電荷に単に変換しているのではないことが示唆される。誘導電圧がない場合、水道水では中性の霧が多量に発生している可能性がある。あるいは、高純水に比べて水道水の緩和時間が3桁小さいことが関係している可能性が考えられる。

## (3) 誘導電極の位置の影響

水道水の場合について誘導電極の位置の影響を示したのが図6(a)、(b)である。流速は $4.25 \text{ m/s}$ で、水柱の長さは約 $45 \text{ mm}$ である。図6から次のことがわかる。

(1) 発生電流および誘導電流とも誘導電極の位置 $l$ の影響を大きく受ける。特に、誘導電極が水柱の先端付近に

あるとき発生電流は極めて大きくなる。

(2) 誘導電流は誘導電圧に対して直線的に増加する。

(3) 発生電流は誘導電圧に対してほぼ対称である。

誘導電圧が零のときの発生電流は  $-0.6 \times 10^{-13}$  A である。誘導電極が水柱の先端付近にあり、 $\pm 1000$  V の電圧印加時には零 V に比べて 3 桁以上の帯電霧を発生させることができる。これはイオン源としては水道水のような純度の低い水を使った方が効果的であることを意味している。誘導電極がノズルに近い位置にある場合には、緩和時間が短いために発生電流および誘導電流ともに小さくなるものと考えられる。

図 7 は、図 6 の低電圧領域を拡大して示したものである。正の帯電霧が発生するには  $\ell = 5$  mm のとき誘導電圧が  $-50$  V 以上、 $\ell = 25$  mm のとき  $-75$  V 以上、 $\ell = 44$  mm のとき  $-120$  V 以上必要であることがわかる。つまりこの領域では正に帯電した水柱から負の帯電霧が発生していることを意味している。図 6 および図 7 から、低電圧領域では発生電流は誘導電圧に対して敏感に反応せず、ある電圧以上で急激に増加する傾向があることがわかる。

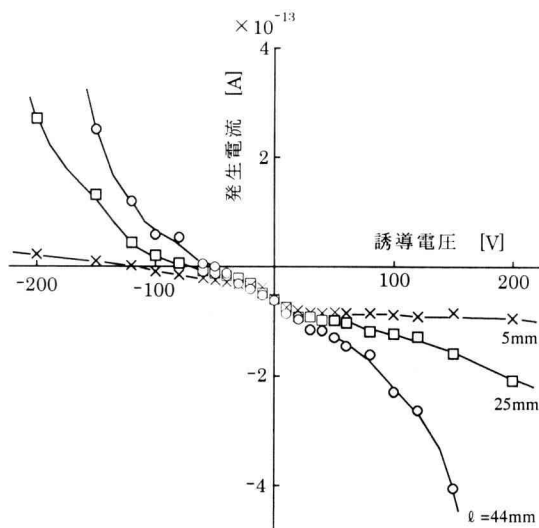


図 7 低電圧領域の発生電流 (水道水)

### 3.2 衝突時の帯電霧の発生

金属上に衝突させた場合について主に述べ、絶縁物上の場合には比較程度にとどめる。3.1 節で述べたように、通常の水道水を用いても十分大きな電荷を持つ帯電霧を静電誘導により発生させることがわかった。そこでここでは通常の水道水レベルの水が衝突した場合についてのみ扱うこととする。

なお、誘導電極は誘導電流が最大になるように水柱の先端付近に設置した。以下の実験はすべてこの条件を守っている。

#### (1) 衝突角度の影響

帯電霧の発生量は衝突角度  $\phi$  に大きく影響を受けることが予想される。図 8 に帯電霧の発生電流  $I_1$  の誘導電圧

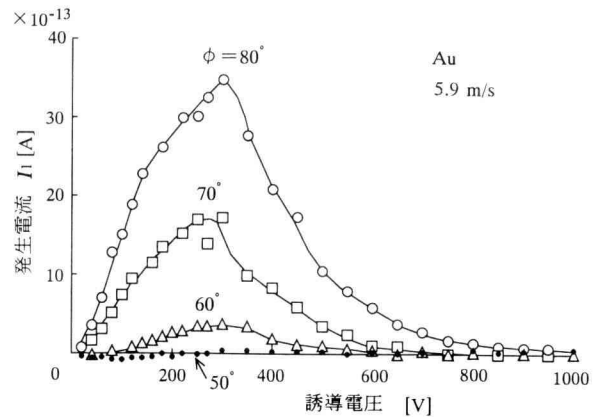


図 8  $I_1$  の誘導電圧依存性の測定例

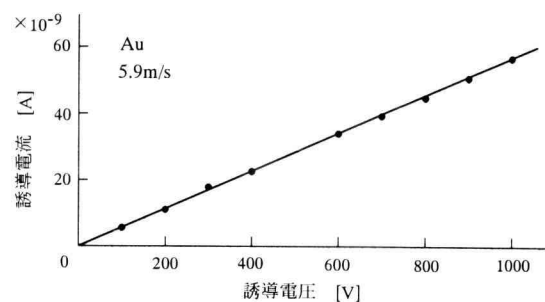


図 9 誘導電流の誘導電圧依存性

依存性の測定例を示す。衝突対象物は  $7 \times 7$  cm<sup>2</sup> の真ちゅう板上に Au を真空蒸着したもので、水の噴出速度は 5.9 m/s である。同図から

(1)  $I_1$  は誘導電圧に大きく依存する。また誘導電圧がある値で  $I_1$  は最大になる。

(2) 衝突角度  $\phi$  が  $50^\circ$  よりも大きくなると、 $I_1$  の値は正方向に急速に増大する。これは正の帯電霧が発生していることを意味している。

図 8 と同時に測定したノズルで発生する誘導電流の電圧依存性を図 9 に示す。正の誘導電圧の印加時に、図 2 の  $I_1$  を測るエレクトロメータの値はいつも正になる。このことはノズルから噴出されるウォータージェットは負の電荷を持っていることを意味している。

図 10 は  $I_1$  に及ぼす誘導電圧の極性の影響を測定したものである。 $\phi = 70^\circ$ 、噴出速度 5.9 m/s、衝突対象物は真ちゅうである。同図から  $I_1$  は誘導電圧に対して対称性を示し、誘導電圧が正のとき  $I_1 > 0$ 、負のとき  $I_1 < 0$  が成り立っている。以上のことから

(3) 衝突角度  $\phi$  が  $50^\circ$  より大きい場合には、帯電したウォータージェットが金属上に衝突するときに発生する帯電霧の極性は、ウォータージェットの極性とは反対である。

この現象は従来の常識では説明が困難である。帯電したウォータージェットの衝突に伴う帯電霧の発生は電荷を持つ液滴の単なる分裂に伴うものではないことが示唆される。

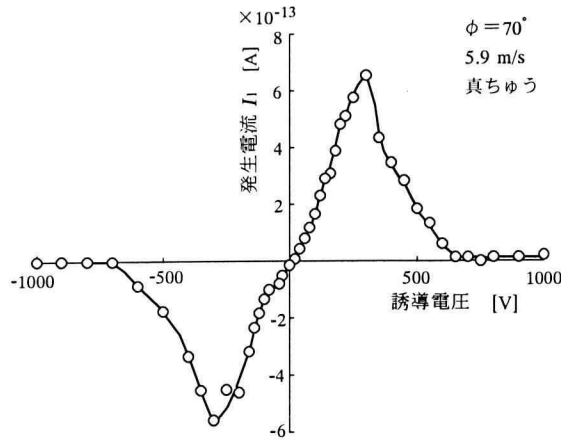


図10 誘導電圧の極性の影響

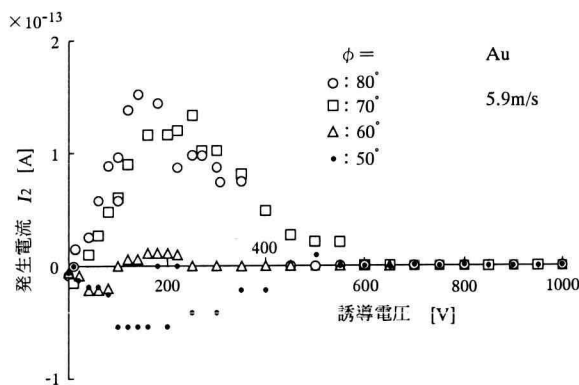
図11  $I_2$ の誘導電圧依存性

図8の $I_1$ と同時に測定した $I_2$ の誘導電圧依存性を図11に示す。結果は噴出時の帯電霧の発生量に関係していると考えられるが、3.1節の結果よりも発生電流値は1～2桁小さい。これはミクロンオーダーの微小な水滴の発生量は多くないことを示している。 $I_1$ の方が1桁以上大きいことから、図11の結果には帯電霧が測定系の下部から仕切板の穴を通して上部に入ってくるものの影響も考えられる。以下の報告では、衝突時の発生電流 $I_1$ に焦点をあてることとする。

## (2) 衝突対象物の材質依存性

帯電霧の発生は衝突対象物の材質の影響を受けることが考えられる。

図12は真ちゅう上に真空蒸着したAuとAlの場合を比較したものである。衝突角度 $\phi$ は $80^\circ$ 、噴出速度は5.9m/sである。同図から、衝突対象物がAuとAlの場合に発生電流 $I_1$ の誘導電圧依存性は同様な傾向を示し有意な差は認められないことがわかる。真ちゅうの場合にも違いは認められなかった。

図13はテフロン上に衝突させた場合の $I_1$ の誘導電圧依存性の1例を示したものである。衝突角度 $\phi$ は $70^\circ$ で、噴出速度は図12と同様に5.9m/sである。また、テフロンの大きさは $70 \times 70 \times 5 \text{ mm}^3$ である。同図から、正の誘導電圧に対して発生電流 $I_1$ は負極性であることがわかる。この

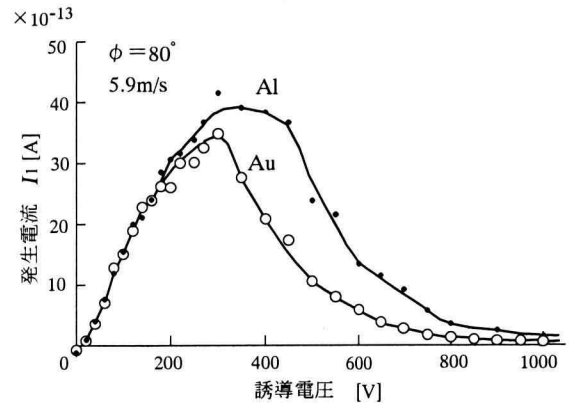


図12 金属材料の効果

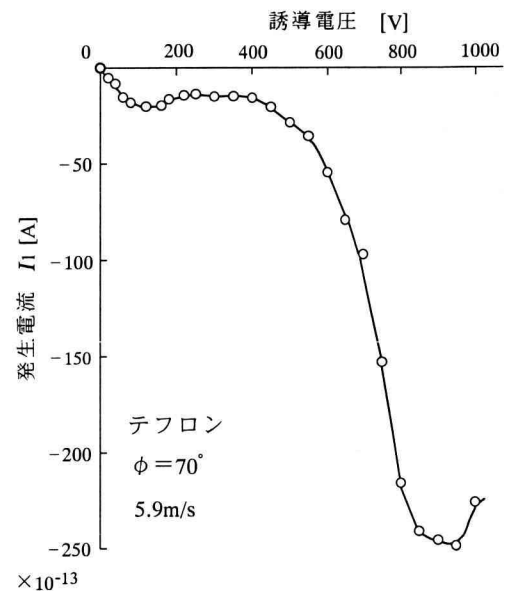


図13 テフロン衝突時の帯電霧の発生

ことは負に帯電した水滴が良い絶縁物であるテフロン上に衝突したとき、微小な負の帯電霧に分裂していることを示している。 $I_1$ の誘導電圧依存性は複雑であるが、帯電霧の極性に関する理解は容易である。

なお、帯電霧を構成する微小な水滴は短時間に蒸発すると考えられるため、その大きさに関する知見は得られていない。

## (3) 噴出速度の影響

液体の噴出速度はノズルの細管内の平均速度で見積もっているが、空気抵抗による減速と重力による加速は本実験条件では大きくないと考えられるため、ノズルからの噴出速度が対象物への衝突速度とほぼ等しいと思われる。

図14に、噴出速度を最大8m/sまで大きくしたときの $I_1$ の誘導電圧依存性を示す。衝突角度 $\phi$ は $80^\circ$ で、衝突対象物は真ちゅう基板上に真空蒸着したAlである。同図から、帯電霧の発生量は4.5m/s以上になると噴出速度に大きく依存することがわかる。また、高電圧になると $I_1$ が抑制

されることは共通にみられるが、速度が大きくなるほど高電圧側にシフトする。 $I_1$ が噴出速度に大きく依存することから、衝突時のエネルギーが帯電霧の発生の関係しているものと考えられる。

図15は、図14と同時に測定した誘導電流の噴出速度依存性である。ほぼオーム則が成り立つこと、および噴出速度が大きくなるほど誘導電流は増大することがわかる。これらの測定は誘導電極をノズルから噴出した水柱の先端付近に設置した場合の結果である。したがって、誘導電極の位置を表す $l$ の値は水柱の長さと考えてよい。誘導電流および誘導電極の位置 $l$ の噴出速度依存性を図16に示す。+1000Vの場合の結果で、他の条件は図14と同じである。同図から、噴出速度の増大に伴い誘導電流は直線的に増大することがわかる。また、 $l$ の値は7 m/sより高速になると減少する。このことは、7 m/s付近までは層流域であるが、それ以上の高速になると乱流に至る前の遷移域に入っていることを示している。

図8で述べたように、衝突角度 $\phi$ が $50^\circ$ の場合には、負に帯電したウォータージェットが金属上に衝突したとき正の帯電霧の発生はほとんどみられない。5.9 m/s以上の高速領域においても同様なことがいえるかどうかを調べた結果が図17である。同図から、7.0 m/sおよび8.3 m/sの場合には図14の $80^\circ$ の場合に比べて値は小さくなるものの、正の $I_1$ が測定されることがわかる。衝突速度が $I_1$ の発

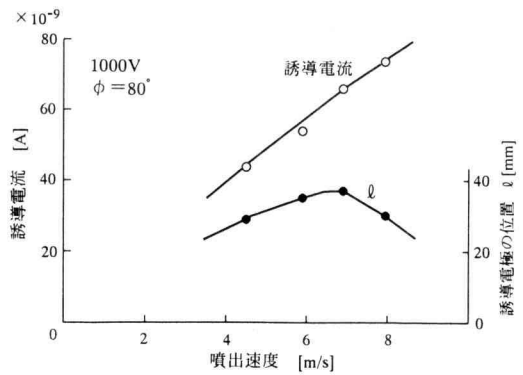


図16 誘導電流の噴出速度依存性

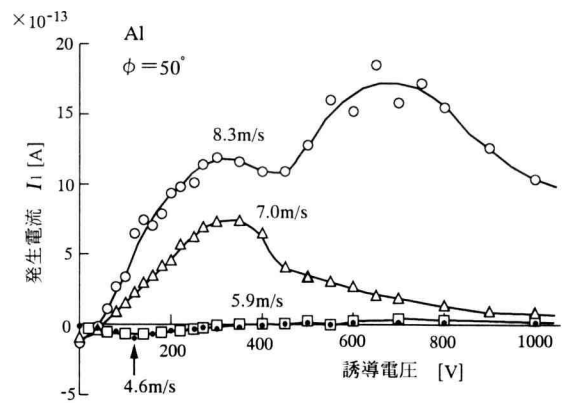


図17  $I_1$ の誘導電圧依存性 ( $\phi = 50^\circ$  の場合)

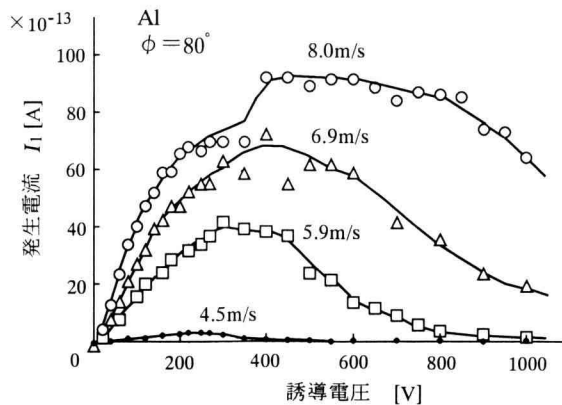


図14  $I_1$ に及ぼす噴出速度の影響

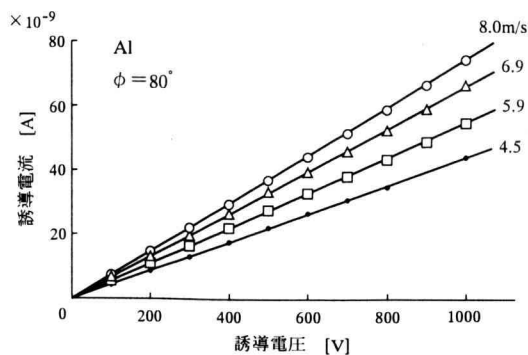


図15 誘導電流に及ぼす流速の影響

生に大きく関係することがここでも示される。

#### (4) 逆極性の帯電霧が発生することに関する考察

3.2節で得られた知見を以下にまとめて示す。

(1) 帯電したウォータージェットが金属上に衝突するとジェットとは逆の極性の帯電霧が発生する。

(2) 帯電霧の発生量は衝突角度が大きくなるほど、また衝突速度が大きくなるほど増大する。

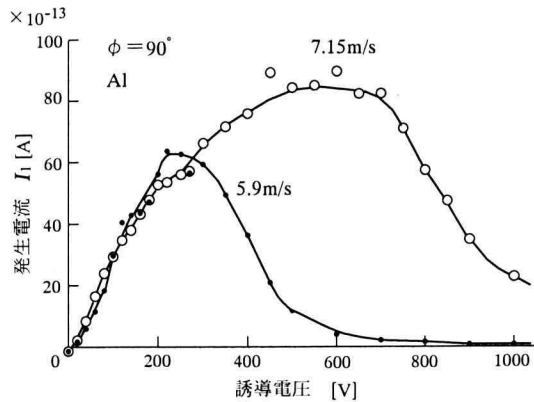
(3) ウォータージェットの帯電極性に関係なくみられる現象である。

(4) この現象は衝突対象物が金属性の場合にみられるが、金属材料には依存しない。

上記の(2)で述べたように、衝突角度 $\phi$ が大きくなるほどこの現象が顕著になることから、直角に衝突させたときに同様の測定を行った。 $\phi = 90^\circ$ のときの結果を図18に示す。同図の結果と図14の結果を比較すると、同じ速度において $80^\circ$ よりも $90^\circ$ の場合の方が $I_1$ は大きくなることがわかる。

$90^\circ$ の場合には衝突対象物上は完全に水で覆われていた。ウォータージェットはアルミ上に直接衝突しているのではなく、その上を覆う水の層に最初に衝突していることがわかった。衝突角度 $\phi$ が大きくなるほどこの水の層の厚さは大きくなるものと考えられる。上記(4)の金属材料に依存しないことは、ウォータージェットが水の層に衝



図18  $\phi = 90^\circ$  の場合の帯電霧の発生

突していることに起因すると考えると理解することができる。

ウォータージェットは水滴の集団となって水の層に衝突していると考えられる。そのため、帯電した一個の水滴が水の層に衝突したとき、逆極性の帯電霧が発生する機構を考えればよい。真ちゅう製の基板はアースされており、基板上の水の層は水道水レベルであるため、水の層はアースされていると考えて良いと思われる。したがって、水の層に帯電した水滴が接近したとき、水の層の表面に影像電荷が誘起される。その量は水滴の電荷量に比例する。水滴が負の電荷を持っている場合で考えると、影像電荷は正極性である。さらに、水滴の中の電荷は水の層に近い側に負電荷が、反対側に正電荷が集まることが考えられる。つまり、衝突直前には水滴は分極した状態になる。

影像電荷の分裂が正の帯電霧に寄与しているのか、あるいは分極電荷の分裂が寄与しているのかを示す直接の証拠は得られていない。しかし、どちらかあるいは両方の電荷が帯電霧の発生に関係していると考えて良さそうである。水滴先端にいる負電荷は水の層に接触すると瞬時にアースに流れ、水の層上に分布する正電荷の一部、あるいは水滴上に残った正電荷の一部が衝突のエネルギーで帯電霧に変換され则认为られる。

誘導電圧が高電圧になると帯電霧の発生が抑制されることの原因は明らかではない。衝突角度が減少すると帯電霧の発生が抑制されるのは、水の層の厚さの減少、と水の分裂に使われる衝突のエネルギーが減少することに起因すると考えられる。

#### 4 まとめ

本研究報告で得られた知見を以下にまとめる。

##### [1] 噴出時

(1) 誘導電極の位置と電圧により噴出時に発生する帯電霧の量をコントロールすることができる。

(2) 静電誘導により、自然噴出時に発生する負電荷の量

よりも2桁以上の帯電霧を発生することができる。

(3) 純度の低い水の方が多くの帯電霧を発生させることができる。

##### [2] 衝突時

(1) 金属上に帯電したウォータージェットを衝突させると、ジェットの極性とは逆極性の帯電霧が発生する。

(2) 衝突角度が増加するほど、また衝突速度が大きくなるほど、この現象は顕著になる。

(3) この現象は金属上の水の層にウォータージェットが衝突するとき発生する。

(4) 逆極性の帯電霧の発生には水面上に誘起される影像電荷、あるいはウォータージェットを構成する水滴が最初に持っていた電荷とは逆極性の分極電荷の分裂に起因する可能性が示唆される。

#### 謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金 基盤研究（課題番号 13650055）の助成を受けて行われたものです。ここに深く感謝します。

#### 参考文献

- 1) 静電気学会編：静電気ハンドブック、p382、オーム社（1981）
- 2) 下川：静電気学会誌、15、p292（1991）
- 3) 浅野、下川：静電気学会誌、22、p204（1998）
- 4) 浅野、下川：静電気学会誌、24、p332（2000）
- 5) 下川：静電気学会講演論文集、22pA8、p393（1992）