

純水の高速噴出時における帯電霧の発生

浅野一明¹・下川博文²

¹ 電気電子工学科電気工学専攻博士課程後期

² 電気電子工学科

Generation of Charged Fog by High-speed Ejection of Pure Water

Kazuaki ASANO¹⁾, Hirofumi SHIMOKAWA²⁾

Abstract

It is well known that many charged particles are generated by the disruption of liquid. This phenomenon is called the Lenard effect. One of the authors clarified that the negatively charged fog is generated around the jet when the water is ejected from a nozzle at the laminar flow (max. 3.2m/s). The purpose of this report is to investigate the generation of the charged fog by high-speed ejection of pure water at turbulent flow. The maximum ejected velocity is 52.5m/s. Experimental results show that positively charged fog is generated from a positively charged jet, therefore the charged fog polarity agrees with the polarity of the jet. The generation current of the charged fog or the streaming current depends on the ejected velocity v , of v^n ($n=3.5$). Negatively charged fog is also generated simultaneously, and its particle size is smaller than a positively charged particle size. Further, the amount of charged fog depends on not only the ejected velocity but also resistivity of the sample water. The generation current on ejection increases with resistivity of the water. It is considered that the factor dominating the amount and the polarity of charged fog at the turbulent flow is streaming electrification of jet rather than the Lenard effect.

Key Words: Water-jet technology, Aerosol particle, Charged fog, Lenard effect, Streaming electrification

1. はじめに

流動帯電や噴出帯電の測定に際して、液柱の周囲に電荷が存在すると、液柱には逆極性の電荷が誘導されるため、正確な測定が困難になる^{1) 2)}。一方水が機械的に分裂すると帯電することはレナード効果として知られ、微小なものはマイナスに、より大きいものはプラスに帯電すると考えられている^{3) 4)}。この帯電微粒子の発生現象は、近年洗浄や切削行程などに広く使われるようになってきたウォータージェットでも起こると予想される。しかし、これまで特別な例を除き問題にされることはなかった。今後、ウォータージェット技術は多分野で、さらに高速化して使われると考えられ、このような電荷源の存在も問題になってくると予想される。そこで、この帯電微粒子について研究することは、学問上のみならず、気象学や産業分野でも重要な意味をもつと考えられる。

本研究で対象とする帯電霧とは、一般にエアロゾル粒子として扱われているものである。この帯電霧は粒子形成後、長時間空間に漂っているようなもので、エアロゾル固体微粒子等に結合し、電荷を供給していると考えられる。すなわちこのような大量の帯電霧が大気電荷の供給源になっている可能性がある。実際に海上の波飛沫や滝から発生する微粒子が電荷をもっていることが報告されている⁵⁾。

著者は以前、最高3.2m/sまでの低速層流領域で流動帯電を測定した論文で、ジェットの周囲に帯電霧が発生していることを報告した^{1) 2)}。このとき発生する霧はマイナスに帯電していた。しかし実際のウォータージェットのような数10m/sの乱流領域で測定された例は皆無に等しい。そこで本論文では純水を最高50m/sの高速で噴出したときの帯電霧について報告する。

本論文では帯電霧について発生量の測定方法の確立と現象解明に的を絞ったため、ノズルからの

噴出、それに伴う分裂のみを対象とし、実用的な場で必ず伴う衝突は扱わなかった。これにより純水の高速噴出時に発生する帯電霧について、その発生量や極性、それを支配する要因を探索することが本研究の目的である。現象の解明には帯電霧の発生特性を知ることが必要であり、ここでは発生電流に着目する。また帯電霧の極性はジェットの流れ帯電量に依存することが予想され、その関係を明らかにする。

2. 測定装置と方法

実験装置の概略を図1に示す。この装置は中央に大型の通過形ファラデーケージを置き、その両側に加圧タンクとファラデーカップを配したものである。

加圧タンクは内径200mm、高さ450mmの円筒形で、バルブ、配管とともにすべてステンレス製である。

試料水は水道水を前処理フィルタ付きのイオン交換器に通した後、蒸留し、その蒸留水を超純水製造器（ミリポア製）で精製した、抵抗率183 k Ω mの超純水を使用した。導電率計（京都電子工業製CM-117S）によりタンク内の水の抵抗率を測定する。加圧タンクに超純水を注入した時点では、約130 k Ω mになった。これは水が空気に触れた際に気体が急速に溶け込むことや注入用パイプやタンクのわずかな汚れによるものである。

噴出用ノズルは外径0.6mm、内径0.3mm、長さ150mmとした。このノズルはステンレス注射針（日本理化学器械製）の先端を直角にカットし、切断面を超精密仕上げ用フィルムで研磨したものである。水の加圧には窒素ガスを用いた。圧力と噴出速度の関係について図2に示す。10MPaで最高52.5m/sの噴出速度が得られる。このうち実験時に設定した噴出速度は20m/s以上の領域である。これ以下の速度ではジェットは通過形ファラデーケージ内で放物線を描きファラデーカップまで達しない。噴出速度はノズルの長さにも依存し、本実験で用いた150mmという長さでは圧力損失が大きいと考えられる。しかしノズル内での流れを整

えるため、この長さとした。

ノズルから横方向に噴出された液柱は、途中で分裂し大小様々な水滴を作る。そのうち通過形ファラデーケージの内部に浮遊あるいは付着した水滴の電荷量を測定する。このケージは外容器、内容器とも1mm厚のアルミニウム板を使用し、外容器の正面幅960mm、奥行き1500mm、高さ1670mm、外容器と内容器の隙間10mmとし、テフロン（PTFE）片を適宜挿入して絶縁した。評価は、通過形ファラデーケージに接続したエレクトロメータ（アドバンテスト製TR8411）で測定される電荷量の時間変化から帯電霧の全発生電流 I_r を算出して行う。

ジェットの回収には、流動電流の測定もできるようにファラデーカップを使用した。材質は外容器が1mm厚のアルミニウム、内容器が1mm厚の真ちゅうであり、またその大きさは外容器が幅220mm、奥行き170mm、高さ230mm、内容器が幅200mm、奥行き150mm、高さ200mmである。内容器は直方体ではなく上部を曲げてある。これはジェットと内壁の衝突角を小さくし、ジェットを壁伝いに流すことで、ファラデーカップ内での帯電霧の発生につながる水の分裂を抑えるためである。このファラデーカップにエレクトロメータ（アドバンテスト製TR8401）を接続し、ジェットの流動電流 I_2 を測定する。

流動電流はノズルでも測定し、 I_1 として評価する。ノズルにはエレクトロメータ（川口電機製MMA II-17A）を接続した。このときタンク周囲にはシールドなどの対策をしなかったため、外部からの誘導が生じる恐れがある。しかし後述のように、実際には誘導が影響しないほど I_1 は大きくなった。

I_1 、 I_2 のレコーダ出力は噴出の初期にわずかに変化するが、1分ほど経過すると安定するので、これから後の値を読みとり、噴出速度とともに評価した。

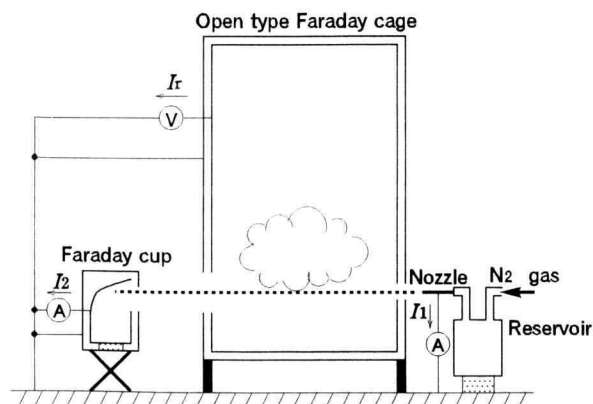


図1 実験装置の概略図

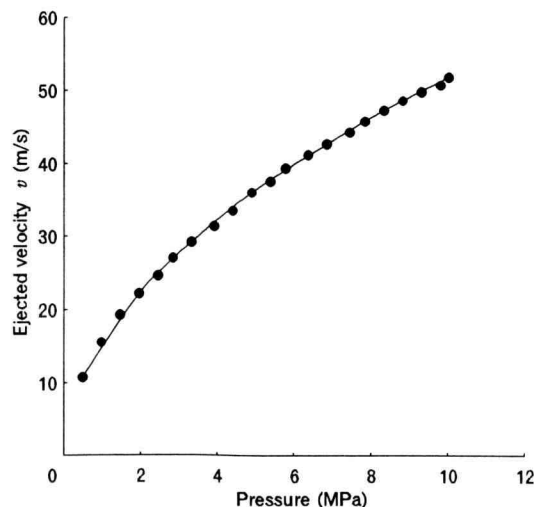


図2 噴出速度の圧力特性

3. 結果

通過形ファラデーケージで測定した帯電霧の全発生電流の噴出速度依存性を図3に示す。発生電流 I_r の極性は測定全領域にわたってプラスとなり、プラスの霧が発生していることがわかった。電流値は0.1～数10nAである。噴出速度 v への依存性を示す

$$I \propto v^n \quad (1)$$

の指数 n の値は、噴出速度38m/s付近に境界をもち、低速側が $n=3.6$ 、高速側が $n=9.8$ だった。この値は例えば噴出速度が2倍になれば発生電流は低速側では約12倍、高速側では約890倍になることを意味している。このように霧の発生量を決定する要因のひとつは噴出速度であることがわかった。

一方、ノズルとファラデーカップで測定した流動電流の噴出速度依存性を図4に示す。グラフには大きさを比較する便宜上、 $-I_1$ と I_2 でプロットした。電流の極性はノズル(I_1)がマイナス、ファラデーカップ(I_2)がプラスになったので、噴出されるジェットはプラスに帯電している。よって帯電霧とジェットの極性が一致することがわかった。値は霧の全発生電流 I_r より2桁ほど大きく10～500nAになった。流動電流はノズルとファラデーカップの間に大きな差は見られず、若干ノズルの測定値 I_1 の方が大きい程度だった。流動電流の指数 n の値は I_1 で測定範囲全域にわたって $n=3.5$ となり、 I_r の低速側とほぼ一致した。

ノズルにおける流動電流 I_1 とファラデーカップにおける流動電流 I_2 の大きさにはわずかに差が生じた。この差はノズルからファラデーカップの間の空間、すなわち通過形ファラデーケージ内で電荷の損失が行われているということを意味する。これは帯電霧の電気的な発生量に該当するはずである。すなわち

$$(-I_1) - I_2 = I_r \quad (2)$$

が成り立つと考えられる。しかし流動電流と発生電流の間には2桁の差があり、またファラデーカップで回収しきれない水滴もあるため、数値で上式を確認するには至らなかった。

4. 考察

4.1 負極性粒子の存在について

レナード効果では、微小な粒子はマイナスに、より大きい粒子はプラスに帯電するとされている。本研究で対象としている粒子は、主に粒径が数 μm から数10 μm を想定している。そこで粒子痕を直視できるMgO膜法⁶⁾によりジェット近傍で粒子径を測定した。染料を下塗りしたスライドガラスにマグネシウムが燃焼することによって発生する白煙(MgO)の膜を作る。そのMgO膜の表面で水滴を

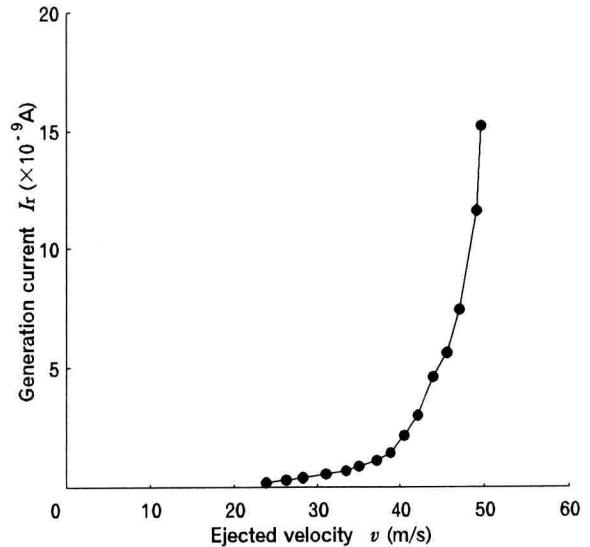


図3 霧の全発生電流の噴出速度特性

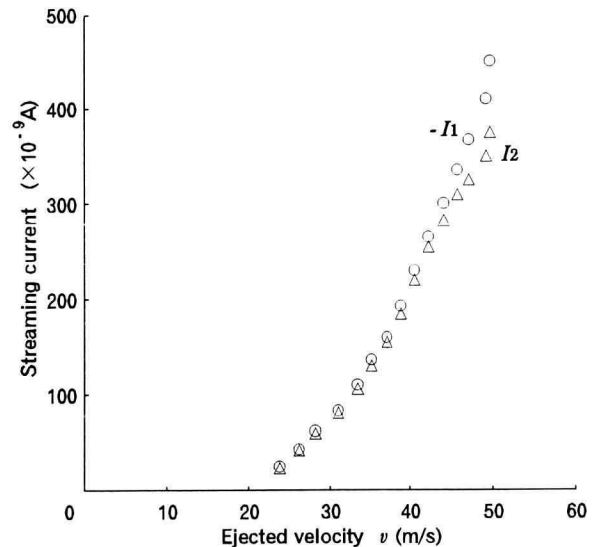


図4 流動電流の噴出速度特性

衝突捕獲すると、下塗りした染料が現れて痕跡が残るので、これを顕微鏡により観察して粒子径を測定する方法である。観測された粒子は直径数10 μm のものから肉眼で確認できる1mm程度のものが含まれていた。一方、図1の装置ではプラス電荷とマイナス電荷の分別は不可能であり、得られる値は両極性の差である。このことからジェットの分裂からは大量のプラスの粒子と微量のマイナスの粒子が発生している可能性が考えられる。

この考察を裏付けるために、次のような方法でマイナスの霧の検出を試みた。通過形ファラデーケージ内に上昇気流を作り、それによって運ばれる粒子を捕らえ測定する。これを分別測定と呼ぶことにする。

分別測定の測定装置の配置を図5に示す。装置は向かって右から加圧タンク、アースボックスの順で設置する。吸引形ファラデーケージはアースボックス上部に取り付けてある。構造は外筒200 \times 200 \times 270mm³、内筒180 \times 180 \times 220mm³の直方体

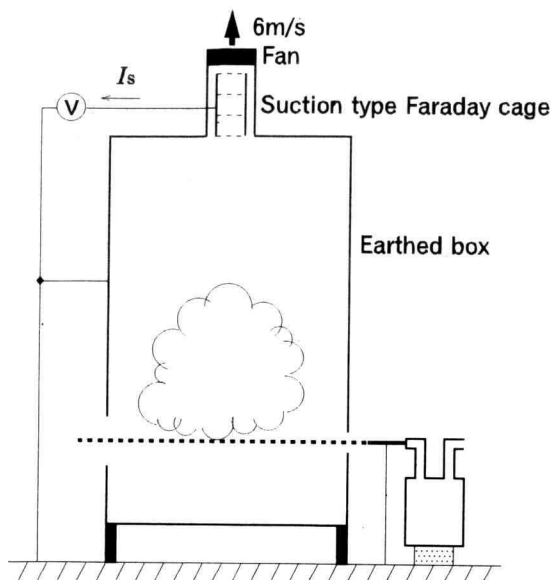


図5 分別測定装置

で、その間の絶縁と帯電霧の進入を防止するため、テフロンをはめ込んである。上部には直径170mmのファン、内筒内部には真ちゅうメッシュ50を四重に装着して微粒子を捕らえる。ファンの風速はおよそ6m/sである。しかしこの風速はあくまでファンで測定されたもので、通過形ファラデーケージ内の風速分布は不明である。

吸引形ファラデーケージにエレクトロメータ（アドバンテスト製TR8411）を接続し、捕集される電荷量を測定する。電荷量の変化が一定の傾きとなるところで電流 I_s を算出した。

分別測定の結果の一例を図6に示す。電流 I_s の大きさは I_r に比べ2桁ほど小さくなった。よってこの測定が、発生した霧のうちファンの風に乗るような小さい粒子だけを対象にしていることを示していると考えられる。 I_s の極性はマイナスなので、高速噴出時には微量のマイナスの霧もプラスの霧と同時に発生していることがわかる。またその粒径分布はマイナス粒子がファンの風に運ばれるような小さい粒子である。小さな粒子がマイナスの電荷を持つことは、レナード効果と一致する。

発生電流 I_s は40m/s付近まで増加した後、次第に減少する。このピークの要因として、プラスの霧の大量発生が考えられる。前章で述べたように、プラスの霧の発生量は噴出速度の3.6乗に比例して増加する。そのためマイナスに帯電した粒子は、発生直後プラスの粒子と再結合してしまい、検出されなくなると考えられる。またファンにより吸引される粒径範囲が毎回同じであると仮定すれば、噴出速度によって粒径に対する極性の分布が変化していると考えられる。すなわちプラスの霧の分布が小粒径側にシフトしたことが予想される。

なお、 I_s の極性はプラスになることもあった。しかしこのときにも上で述べたことから、噴出においては両極性の粒子が同時に発生していること

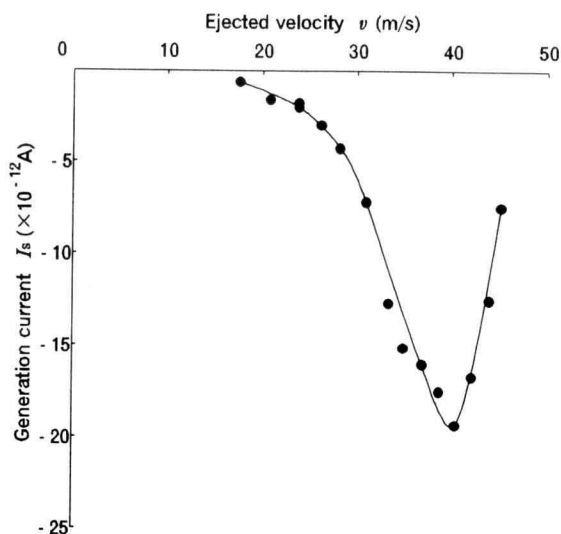


図6 吸引した霧の発生電流の噴出速度特性

は明らかである。

4.2 流動電流の噴出速度依存性と帯電霧による誘導

前章で述べたように、(1)式に示した流動電流の噴出速度依存性の指数 n は $n=3.5$ である。この n の値については、液体の種類によって値が異なり、水で $n=3$ 、アルコール類で $n=1.5\sim 4$ という値が報告されている^{1) 2)}。一方この値は測定方法によっても変化し、水について周囲に送風し帯電霧を除去して測定すると $n=1$ ^{1) 2)}、エタノールについて装置による誘導を考慮すると $n=0.7$ ¹⁾という値が報告されている。いずれにしてもこれらは10m/s以下の低速領域で噴出したときの値であり、本研究のような高速領域での報告はほとんど見あたらない。

全発生電流 I_r の指数 n の高速側の値は低速側や流動電流に比べて非常に大きい。この要因として、実際の発生量以外に測定方法が影響していることも考えられる。ノズルからの噴出では高速領域になるほどジェットの分散による広がり角は大きくなるという報告がある³⁾。この広がりのため大きな液滴も通過形ファラデーケージに付着し測定されるので、発生電流が急激に増加するのだと考えられる。実際、通過形ファラデーケージの内側、ジェットの出口付近に水滴が付着していることが測定後に確認された。

10m/s以下の低速領域の測定¹⁾で問題となっている帯電霧によるジェットの誘導帯電は、本研究のような高速噴出では生じない、あるいは生じていても問題にならないと考えられる。低速噴出では発生電流は 10^{-11} A、流動電流もほぼ同様の値である。しかし高速噴出では前述したように発生電流が 10^{-9} A、流動電流は 10^{-7} Aで低速領域よりも遥かに大きい値となる。図7に噴出中の流動電流 I_r の時間変化の一例(44.0m/s)を示す。噴出開始当初に多少の電流値の減少があるが、その後はほ

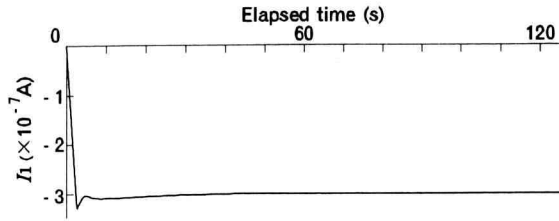


図7 流動電流の時間経過波形

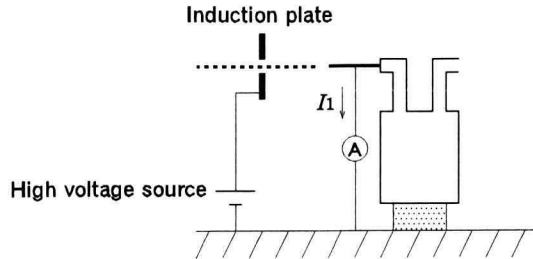


図8 誘導噴出測定装置

ば一定の値を保つ。霧が安定して発生しジェット周囲に大量に漂っていると思われる時間が経過しても、流動電流に変化は見られないので、誘導帯電の問題はないといえる。

4.3 帯電霧の発生に及ぼす流動帯電の影響

3章で述べたように、帯電霧の全発生電流とジェットの帯電極性がプラスで一致したことから、帯電霧の極性に水の流動帯電の極性が大きく関係すると考えられる。レナード効果の説明は中性の水を対象としたものだが、本報告のようにプラスに帯電した水からは、プラスに帯電した粒子が発生する確率は高くなるものと考えられる。また乱流領域では流れとともに電気二重層も乱れることが考えられ、その分、分散しやすくなりプラスに帯電した粒子が増えるものと予想される。

以上のように通常の噴出では流動帯電が帯電霧の極性に影響を及ぼすことが明らかになった。よってジェットの帯電の度合いに応じて、帯電霧の極性がどのように変化するかわかれば、帯電霧の制御が可能になることが期待される。そこでジェットの帯電量や極性を外部電界による誘導で制御し、発生する霧について測定した。

測定装置を図8に示す。外部誘導電界を作るための誘導電極は $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 、厚さ 1 mm の真ちゅうで、ノズルの先から 55 mm の位置に垂直に、ジェットに対して直角に設置した。電極の中心にはジェットを通過させる直径 35 mm の穴を開けてある。ジェット内にマイナス電荷を誘導するために、電極に印加する電圧（以下、誘導電圧と記す）は極性がプラスで、最高数 kV である。誘導電圧は噴出速度や同じ速度でも流動帯電の程度など、そのときの状態に左右されるため毎回異なる。そこで電圧の調整は、ノズルで測定される流動電流 I_1 を見ながら行った。

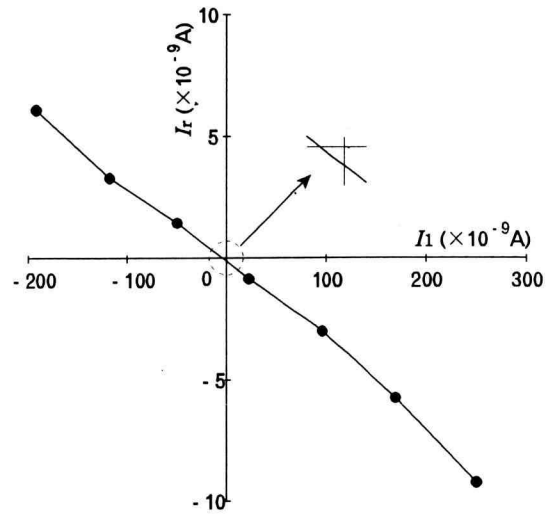


図9 発生電流と流動電流の関係 (49.5 m/s)

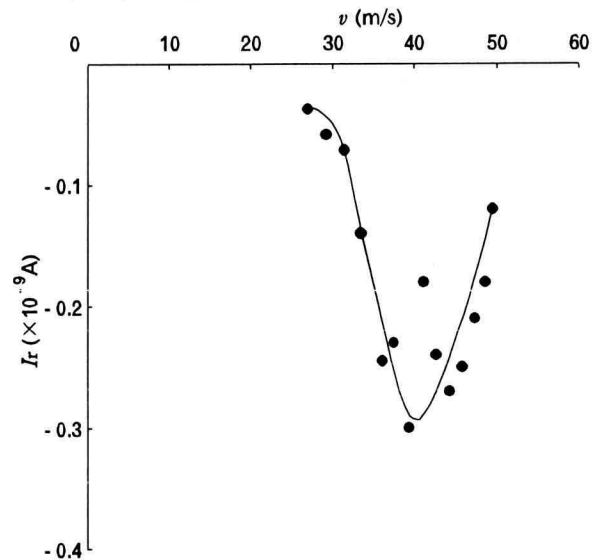


図10 中性のジェットから発生する帯電霧の噴出速度依存性

なお液体が微粒化する時点で外部電界がある場合、分裂後の微粒子が大きな電荷を持つ。一般的には外部電界が強いほど粒子の電荷量は大きくなるが、レイリーリミットと呼ばれる表面電荷密度の極限值以上の電荷を持つことはできない⁵⁾。また外部電界がある値以上に大きくなるとジェットは静電霧化する。ここで行う誘導噴出はこの静電霧化の領域に入らない範囲で行うべきであるが、電界と電荷量や分裂との関係がわからなかったため、ジェットの分散プロセスにかなり影響しているものと思われる。これは電圧を上げていくと、ファラデーカップの回収口からはずれて、その外容器に衝突する粒子が増えることから推測できる。よってジェットの分散角度は通常よりかなり大きくなっている可能性がある。

測定されたデータを発生電流 I_r と流動電流 I_1 の関係として評価した。その一例として噴出速度 49.5 m/s についての結果を図9に示す。

流動電流 I_1 がマイナス、すなわちジェットがプ

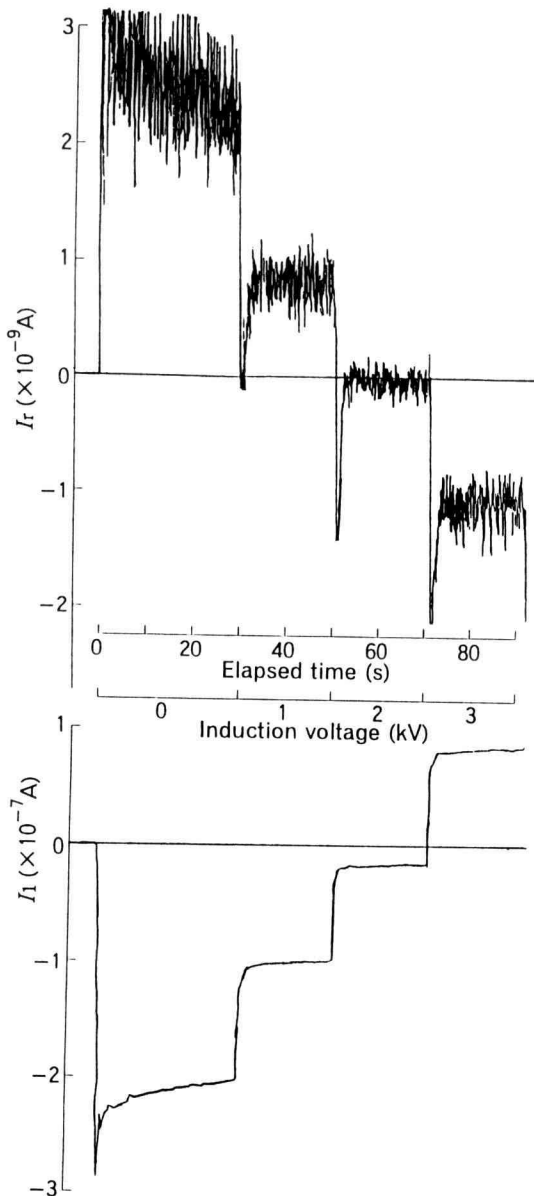


図11 誘導噴出実験のレコーダ出力

ラスに帯電しているときは、発生電流 I_g がプラスなので、プラスに帯電した霧が検出された。またマイナスのジェットからはマイナスの霧が検出された。このようにジェットと帯電霧の極性はジェットの帯電極性に関わらず概ね一致することがわかる。

ところが流動電流 $I_i = 0$ の付近を拡大すると、中性の水からわずかにマイナスの霧が発生していることが読みとれる。ノズルから中性の水を噴出しているときには、発生電流はマイナスとなり、わずかにマイナスの霧が発生している。このことは中性の水の分裂により帯電粒子が発生するというレナード効果と一致する。 $I_i = 0$ となったときの I_g について噴出速度依存性を図10に示す。 I_g は噴出速度 v に対して40m/s付近にピークを持つカーブとなる。これは図6に示した分別発生電流 I_g のピークと一致した。このことは40m/s付近に流れや分裂の変化、あるいは流動帯電機構の変化する

点が存在することを暗示しているが、詳細は不明である。

図11に I_g と I_i のレコーダ出力の一例を示す。誘導電圧を変化させると I_g と I_i は同時に階段状に変化する。帯電霧についてここでは発生電流 I_g をエレクトロメータの電流レンジで直接測定した。 I_g は激しく振動する。このことから帯電霧の発生状況の時間的変化がわかると考えられる。すなわち帯電霧の発生は時間的に一定でなく、分裂機構や流動帯電のわずかな変化により、ある瞬間での正味の発生量にはかなり差があることが示されている。

この図で特に注目するのは、 $I_g = 0$ として評価した3つ目のステップ（経過時間50~70[s]）である。 $I_g = 0$ というのは振幅の平均値、すなわち正味0ということで、実際にはプラス、マイナスに大きく振れている。よって $I_g = 0$ のときも帯電霧自体は発生しており、その量はプラス、マイナス等量であると判断した。

4.4 試料水の抵抗率の影響

これまで一連の実験では、いずれも数回の測定を繰り返し再現性を得ることを試みたが、実験によってデータにはばらつきが現れた。特に前節に述べた誘導噴出実験のときは、同じ噴出速度でも中性のジェットを得るための誘導電圧に数100Vの差が現れ、そのばらつきは顕著だった。要因として試料水の温度や純度、実験環境の気温や湿度、ノズルの位置や向きなどが考えられる。その中でも試料水の抵抗率は、流動帯電の度合いを決めるものであり、ばらつきの大きな要因の一つと考えられる。帯電要素として前述した電気二重層の分裂と電荷の緩和がある。いま超純水183k Ω mとして電荷緩和時間を求めると、 $\tau = 126.4 \mu$ sが得られる。抵抗率が低下するとさらに緩和時間は短くなる。一方、ノズル先端から数cmでジェットが分裂するという報告があるので⁸⁾、液滴形成に要する時間は、緩和時間よりおよそ1桁小さくなる。液滴の形成時間が緩和時間より遥かに短い場合には、ジェット中で電荷は十分に緩和できず、その結果液滴は帯電する。このように噴出帯電に純度が影響することは容易に予測できる。

試料水の抵抗率の調整は次のように行った。試料水は超純水をタンク内で長時間放置することで抵抗率を変化させて使用した。タンクに注入した直後でも130k Ω m程度まで低下していたが、さらに放置することで一週間後には25k Ω mの蒸留水程度になった。

帯電霧と流動電流の測定方法および評価方法は2章に述べたものと同様である。

図12に霧の発生電流の噴出速度依存性を抵抗率をパラメータとしてプロットしたものを示す。発生電流の値は水の抵抗率に大きく依存する。抵抗率が高い方、すなわち純度の高い水の方が霧の発

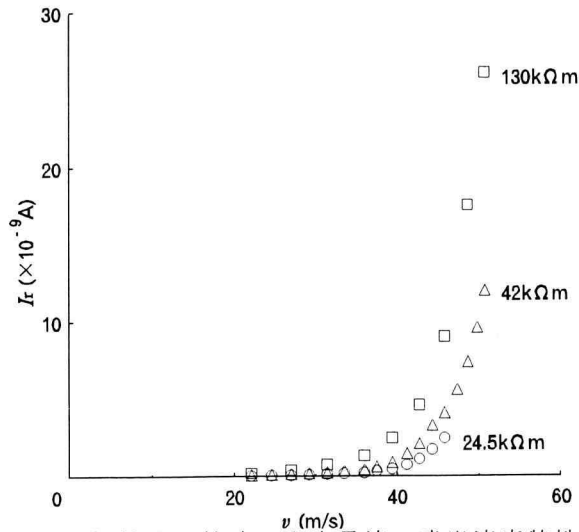


図12 抵抗率比較時の発生電流の噴出速度特性

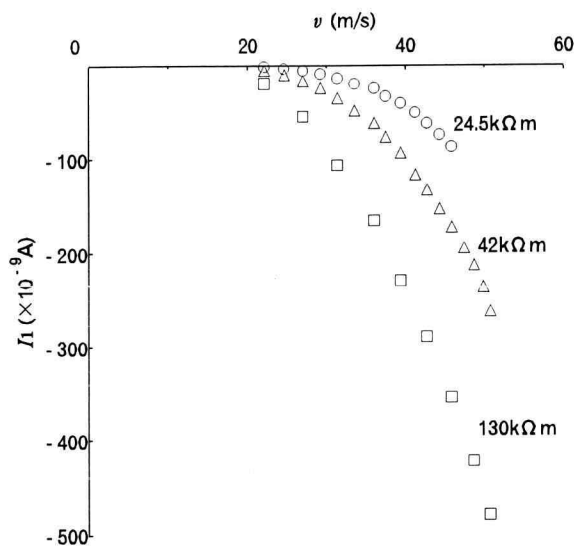


図13 抵抗率比較時の流動電流の噴出速度特性

生量が多いことがわかる。130 kΩ mの水の I_r は25 kΩ mのそれに比べ最高十倍の値となった。

同時に測定した、ジェットの流れ電流の噴出速度依存性を抵抗率をパラメータとして図13に示す。これも抵抗率に依存しており、抵抗率の高い方が電流値が大きいことがわかる。

このように流動電流、発生電流とも抵抗率が高い方が大きくなったことで、電荷緩和時間と流動帯電の関係が現れた形となった。実際のウォータージェット技術では、不純物混入による応用が行われている。よって抵抗率に大きく依存することは無視できない重要な問題だと考えられる。

5. 結論

本報告で明らかになったことを以下にまとめる。

- (1) 純水をノズルから数10 m/sの高速、かつ外部からの誘導のない状態で噴出した場合、帯電霧の発生電流はプラスとなり、低速噴出時の極性と逆になる。
- (2) 帯電霧の発生電流は噴出速度の3.4～9.8乗に比例する。またジェットの流動電流も噴出速度の3.5乗に比例し、霧とジェットに密接な関係が示唆される。帯電霧の極性はジェットの極性に依存し、両者はほぼ一致する。
- (3) 強制的に中性の水を噴出した場合、発生する霧はマイナスに帯電しており、レナード効果と一致する。
- (4) 噴出速度40 m/s付近で帯電霧の発生機構に何らかの変化が生じている。
- (5) 帯電霧の発生量は試料水の抵抗率にも依存する。

今後、帯電霧については、それを構成する粒子一粒当たりの大きさや電荷量、粒度分布、発生量の雰囲気による影響、衝突時の発生量を測定する予定である。また帯電霧の発生の鍵となっている流動帯電メカニズムについての解明が必要である。

謝辞

本論文をまとめるに当たり、卒業研究として協力してくれた本学卒業生の小野裕平氏（現在、(株)雄電社勤務）と由良光利氏（現在、永田部品製造(株)勤務）に深く感謝します。

参考文献

- 1) 下川博文：静電気学会誌, 15(1991)292
- 2) 下川博文：神奈川工科大学研究報告B, 15(1991)217
- 3) 静電気学会編：静電気ハンドブック, p104他, オーム社(1981)
- 4) 浅野和俊：電気学会論文誌D, 108, 4(1988)362
- 5) A.G.Bailey: Electrostatic Spraying of Liquids, p48, p67他, Research Studies Press(1988)
- 6) 田代繁甲・松井満・藤林宏一・村崎憲雄：静電気学会講演論文集'92, 143
- 7) 下川博文：平成5年電気学会全国大会No. 766
- 8) 清水正則・新井雅隆・廣安博之：日本機械学会論文集B, 49, 448(1983)2886